

**Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW-
Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einher-
gehender Sichtbehinderung**

Dem Fachbereich Maschinenbau

an der

Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Norbert Fecher

aus Laufach

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau
Tag der Einreichung:	1. März 2005
Tag der mündlichen Prüfung:	26. April 2005

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (*fzd*) der Technischen Universität Darmstadt.

Ich danke dem ehemaligen Leiter des Fachgebiets, Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Bert Breuer, der mich bereits während meines Studiums die Faszination an der Fahrzeugtechnik lehrte und damit maßgeblich meinen Werdegang beeinflusste. Als späterer Chef schenkte er mir Vertrauen und Rückhalt und bot mir besonders während der Geburten meiner drei Kinder die Freiräume, die neben den dienstlichen Belangen auch die Gründung einer Familie zuließen. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets, gilt mein besonderer Dank für die Fortführung dieser selbst bestimmten und vertrauensvollen Zusammenarbeit. Ich schätze ihn als verlässlichen und fairen Partner, der durch die kritische, fachliche Diskussion sowie durch Motivation sehr zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats.

Weiterer Dank gilt den Projektpartnern BMW AG und Robert BOSCH GmbH (Schwieberdingen) für die Finanzierung und Durchführung des Projekts S.A.N.T.O.S. Zusammen mit den fünf universitären Partnern (IAD – TU Darmstadt, IZVW - Uni Würzburg, LfE – TU München, IVW – TU Dresden und URE – Uni Regensburg) entwickelte sich ein starkes, von freundschaftlicher Zusammenarbeit geprägtes Team, an das ich mich gerne erinnere. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen bilden den Grundstein dieser Arbeit.

Großer Dank gilt auch meinen Studenten, die als Studien- oder Diplomarbeiter sowie als Hilfswissenschaftler erheblichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Allen Mitarbeitern des Fachgebiets sowohl aus dem wissenschaftlichen als auch dem nicht-wissenschaftlichen Bereich danke ich für das unvergleichliche Umfeld, das von großem gegenseitigen Verständnis und Hilfsbereitschaft geprägt ist. Viele meiner Kollegen sind mir über den Dienst hinaus zu echten Freunden geworden.

Meinen Eltern danke ich für die Begleitung durch meine Ausbildung und die fortwährende, interessierte Unterstützung meines bisherigen Berufsweges.

Letztlich gebührt der größte Dank meiner lieben Frau Yvonne und meinen Kindern Moritz, Jacob und Felix. Nur durch ihren liebevollen Beistand, ihre Geduld und die bedingungslose Übernahme aller Lasten, war ich der Lage diese Arbeit abzuschließen. Bei ihnen fand ich den Ausgleich und in schwierigen Zeiten den Rückhalt, um den Blick wieder nach vorne zu richten.

Widmung

Diese Arbeit widme ich meinem Großvater und Freund Alfred Aulbach, der während der Bearbeitungszeit verstarb. Ich bin dankbar dafür, in ihm einen Menschen in meiner Nähe gehabt zu haben, der es wie kaum ein anderer verstand, seinen Mitmenschen mit Anstand und Respekt gegenüber zu treten. Durch sein Leben und nicht zuletzt durch seinen Beruf des Werkzeugmachermeisters entfachte er in mir die Begeisterung für die Technik und den Maschinenbau.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Historie	1
1.2	Motivation	2
2	Stand der Forschung	4
2.1	Methoden und Definitionen	4
2.2	Längsdynamisches Fahrerverhalten	6
2.2.1	Freie Fahrt	6
2.2.1.1	Stationäre Verkehrsbeobachtung	6
2.2.1.2	Untersuchungen im Fahrsimulator	9
2.2.1.3	Modelle und Regelkreisbeschreibungen	9
2.2.1.4	Fazit	11
2.2.2	Übergangssituationen	11
2.2.3	Folgefahrt	12
2.2.3.1	Stationäre Verkehrsbeobachtung	12
2.2.3.2	Untersuchungen im realen Straßenverkehr	13
2.2.3.3	Untersuchungen im Fahrsimulator	15
2.2.3.4	Modelle und Regelkreisbeschreibungen	15
2.2.3.5	Fazit	16
3	Zielsetzung und Hypothesenbildung	17
3.1	Forschungsbedarf	17
3.2	Einordnung	18
3.3	Zielsetzung und Grenzen	19
3.4	Hypothesenbildung	19
3.4.1	Top-Down-Ansatz	19
3.4.2	Ableitung der Hypothesen	21
3.4.2.1	Abhängigkeiten der Grundgrößen	21
3.4.2.2	Dynamik der Fahrt	22
3.4.2.3	Einfluss der Witterung	22
4	Methodik	23
4.1	Versuchskonzept	23
4.1.1	Fahrer	25
4.1.2	Fahrzeug	26
4.1.3	Umgebung	28
4.1.4	Versuchsdurchführung	29
4.2	Definitionen und abgeleitete Größen	29

4.2.1	Fahrdynamische Kennwerte.....	29
4.2.1.1	Tempolimitnutzung.....	30
4.2.1.2	Maximalbeschleunigungen/-verzögerungen.....	33
4.2.1.3	Anzahl an Überholungen.....	36
4.2.2	Witterungsklassifikation.....	37
4.2.3	Situationen.....	38
4.2.3.1	Folgefahrt.....	38
4.2.3.2	Freie Fahrt.....	39
4.2.4	Größen aus der Videoauswertung.....	40
4.3	Statistische Verfahren.....	40
4.3.1	Zweistichprobentest.....	40
4.3.2	Regressionsanalyse.....	41
4.3.3	Graphische Datendarstellung.....	42
5	Ergebnisse.....	43
5.1	Grundgrößen des Folgefahrtverhaltens.....	44
5.1.1	Stationärer Folgeabstand.....	46
5.1.2	Stationäre Folgezeitlücke.....	49
5.1.3	Straßenklasse.....	51
5.1.4	Gewählter Fahrstreifen.....	53
5.1.5	Vorausfahrzeug.....	55
5.1.6	Zwischenfazit.....	59
5.2	Einfluss der Dynamik auf das Folgefahrtverhalten.....	60
5.2.1	Einfluss der maximalen Verzögerungen.....	60
5.2.2	Einfluss der maximalen Beschleunigungen.....	63
5.2.3	Querabhängigkeiten dynamischer Größen.....	65
5.2.4	Einfluss der Geschwindigkeit.....	67
5.2.5	Einfluss der Anzahl eigener Überholvorgänge.....	70
5.2.6	„Vorbeischauen“ in Folgefahrt.....	73
5.2.7	Zwischenfazit.....	74
5.3	Einfluss der Witterung.....	75
5.3.1	Folgeverhalten.....	76
5.3.2	Geschwindigkeitswahl.....	79
5.3.3	Verzögerungs- und Beschleunigungsverhalten.....	82
5.3.4	Zwischenfazit.....	82
6	Diskussion.....	83
6.1	Zielerreichung und Gültigkeit.....	83
6.1.1	Probanden.....	83
6.1.2	Versuchsstrecke.....	84

6.1.3 Fahrzeug.....	85
6.2 Empfehlungen.....	85
6.3 Ausblick.....	90
7 Zusammenfassung.....	91
8 Anhang	93
9 Quellen	95

Abkürzungen

Zeichen	Erklärung
ACC	Adaptive Cruise Control - Abstandsregelsystem
ABS	Antiblockiersystem
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
LDW	Lane Departure Warning - System zur Warnung beim Verlassen der Spur
LKS	Lane Keeping System - Spurhalteassistent
MW	Mittelwert
S.A.N.T.O.S	Situations-angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung (3-jähriges Forschungsprojekt, BMBF/Industrie/Universitäten)
Stdabw	Standardabweichung

Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Einheit	Erklärung
α	1	Signifikanzniveau nach [12]
b_1	var.	Konstante der Schätzfunktion \hat{y}
b_2	var.	Linearkoeffizient der Schätzfunktion \hat{y}
\bar{d}	m	Mittelwert des Abstands in Fahrsituation
d_m	m	Median des Abstands in Fahrsituation
e_i	var.	Residuen
F	N	Kraft

Zeichen	Einheit	Erklärung
H_0	-	Nullhypothese in statistischen Tests
m	kg	Masse
N	1	Anzahl, Stichprobenumfang
r^2	1	Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion
σ	var.	Standardabweichung
σ_{mitVS}	var.	Standardabweichung mit Vorbeischau
σ_{ohneVS}	var.	Standardabweichung ohne Vorbeischau
SQE	var.	erklärte Abweichungsquadratsumme der Regression
SQR	var.	nicht erklärte Abweichungsquadratsumme der Regression
SQT	var.	zu erklärende Gesamtabweichungsquadratsumme der Regression
τ	s	Zeitlücke zum voraus Fahren
τ_{mitVS}	s	Zeitlücke mit Vorbeischau
τ_{ohneVS}	s	Zeitlücke ohne Vorbeischau
v_{50}	km/h	50% der Fahrer fahren langsamer als diese Geschwindigkeit
v_{85}	km/h	85% der Fahrer fahren langsamer als diese Geschwindigkeit
v_{mitVS}	km/h	Geschwindigkeit mit Vorbeischau
v_{ohneVS}	km/h	Geschwindigkeit ohne Vorbeischau
x_i, y_i	var.	Beobachtungswertepunkt aus Stichprobe
\hat{y}	var.	Schätzfunktion der Regressionsanalyse
Z	-	Prüfgröße Z in statistischen Testverfahren

1 Einleitung

Die zunehmende Ausstattung von Kraftfahrzeugen mit Elektronik und Sensorik erlaubt die Darstellung verschiedener Fahrerassistenzfunktionen, wie beispielsweise Adaptive Cruise Control (ACC) oder Lane Departure Warning (LDW) (Honda 2000, [69], Winner 1996, [146]). Diese neuen Systeme basieren auf der im Vergleich zu früher sensorisch umfangreicheren Erfassung der Umgebung und der aufgrund steigender Rechnerleistung verbesserten Interpretation der aktuellen Verkehrssituation (Busch 2004, [23]). Zusammen mit den Kenntnissen über das Verhalten des Fahrers sowie der anderen Verkehrsteilnehmer, über die derzeit nur Annahmen getroffen werden können, ist es möglich, die vorliegende Situation im Fahrzeugrechner in Echtzeit zu modellieren und Aussagen über deren weiteren Verlauf zu treffen. Dieses künstliche „Situationsbewusstsein“ ist die Basis, dem System Fahrer-Fahrzeug eine angemessene Unterstützung anbieten zu können, die sich letztlich in einem Komfortgewinn für den Fahrer oder einer Erhöhung der Sicherheit des Gesamtsystems äußern kann (Reichart und Haller 1995, [113]).

Zur Realisierung neuer Assistenzfunktionen sowie zur Funktionserweiterung bestehender Systeme fehlt an vielen Stellen allerdings noch die Kenntnis über das Fahrerverhalten sowie das Verhalten der Interaktionspartner (Willumeit 1997, [143]).

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Folgeverhalten von Fahrzeugführern analysiert, mit dem Ziel, die unterschiedlichen Einflüsse auf die aktuelle Situation, wie Straßenklasse, variierende Führungsfahrzeuge, Witterungsverhältnisse etc. anhand eines Referenzkollektivs zu beschreiben, um anschließend Empfehlungen geben zu können, wie aufgrund des neuen, steigenden „Situationsbewusstseins“ der Systeme in der entsprechenden Situation eine adäquate Assistenz angeboten werden kann.

1.1 Historie

Das längsdynamische Fahrerverhalten ist bereits seit langer Zeit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Im Fokus der Forschung standen in der Anfangsphase zunächst sicherheitstechnische Aspekte. So beschreibt Regensburger [112] bereits 1963 die Fahrtsicherheit anhand des Fahrerverhaltens. Nur wenig später wird begonnen, den nichtlinea-

ren Regelkreis des Systems Fahrer-Fahrzeug in Folge- und Kolonnenfahrt mathematisch zu beschreiben (Johannsen 1971, [72], Dreyer 1976, [35] und Dreyer et al. 1984, [33]).

In den 70er und 80er Jahren stand die Analyse des Geschwindigkeits- und Abstandsverhaltens bei unterschiedlichen Witterungen im Mittelpunkt des Interesses, mit dem Ziel, sowohl für die Fahrschulbildung als auch für den Bußgeldkatalog sichere Empfehlungen zu geben. Burckhardt (1974, [22], 1980, [21] und 1991, [20]) und Heinz (1981, [63]) stellten hierzu theoretische Betrachtungen an, und Hoffmann (1984, [67]), Hiersche (1989, [64]) und Knepper (1992, [77]) zeigten in ortsfesten Experimenten die reale Reduktion der Geschwindigkeit sowohl auf innerstädtischen Autobahnen als auch auf Landstraßen unter ungünstigen Witterungsbedingungen.

Um die Verkehrssicherheit zu erhöhen, beschäftigten sich zahlreiche Forscher ab 1980 mit der Analyse des Menschen und seinen Fähigkeiten als Fahrzeugführer und leiteten aus ihren Ergebnissen Forderungen an den Entwurf von Bedienelementen (Wanzke 1980, [139]) und Fahrzeugeigenschaften (Danner 1981, [26], Dreyer 1989, [34]) ab. Donges [30] befasste sich 1985 mit der Aufgabe des Fahrzeugführens und analysierte die Verbindung zwischen Längs- und Querführung. Zeitgleich empfahl Rompe [123] nach Simulatorversuchen die Einführung von Fahrerinformationssystemen, die im Bereich fahrdynamischer Grenzen warnen. 1992 wurde von Piske [109] ein Abstandswarngerät im Fahrsimulator erprobt. Sowohl Rompe als auch Bald (1987, [5]) leiteten aus der Analyse des Fahrerhaltens Empfehlungen zur Optimierung des Straßenentwurfs ab.

Mit der breiten Einführung von PC-Systemen wurden ab 1989 zahlreiche Fahrermodelle zur mikro- und makroskopischen Verkehrsflusssimulation erstellt und entweder im Fahrsimulator (Mitschke 1989, [97], Reichelt 1990, [115] und Chen 1992, [25]) oder in ortsfesten Verkehrsbeobachtungen validiert (De Vos 1992, [27]).

Ab Mitte der 90er Jahre eröffneten mechatronische Systeme und die zunehmende Anzahl an elektronischen Komponenten im Fahrzeug neue Möglichkeiten zur Entwicklung von Systemen zur Fahrerunterstützung. Zur Beurteilung dieser Systeme unterteilte Fastenmeier [42] den Verkehrsablauf in getrennt analysierbare Situationen und zeigte später das Potenzial von Abstandsregelsystemen auf [44].

1.2 Motivation

Mit der Verfügbarkeit fahrzeugautonomer Abstandsmesstechnik in der Forschung wurden ab 1996 erste Abstandsregelsysteme, zunächst ohne Bremseneingriff (Fancher et al. 1998, [40]), sowie komplexere Situationen, wie Kolonnenfahrten unter Berücksichti-

gung des vorvorausfahrenden Fahrzeuges (Witte 1996, [149]), dynamischen Situationsübergängen (Filzek 2003, [49]) oder Fahrten in städtischen Bereichen (Naab 1998, [99], Nirschl et al. 1997, [105]) untersucht. Mit der Serieneinführung von ACC wurden darüber hinaus auch die Einflüsse auf das Fahrerverhalten sowie Lerneffekte (Weinberger 2001, [140]) und Gestaltungshinweise aus ergonomischer Sicht (Abendroth 2001, [1]) beschrieben.

Die jüngere, meist interdisziplinäre Forschung beschäftigt sich bis heute damit, die Bedienung verschiedener Fahrerassistenzsysteme in einem einheitlichen Human-Machine-Interface zusammenzuführen (Haller 1999, [54]) und die Funktionen der Einzelsysteme an die Bedürfnisse des Fahrers sowie an die Erfordernisse der Verkehrssituation anzupassen. Ziele sind dabei, den Komfort und/oder die Sicherheit der Systeme zu erhöhen und dabei die Systemaktionen für den Fahrer dennoch transparent zu halten, d.h. dass der Fahrer trotz Anpassung der Funktionalität in gleichen Situationen immer gleiche Systemfunktionalität erwarten darf (König 2004, [79], Reichart/Haller 1995, [113]).

Funktionen zukünftiger und zum Teil bereits in Serie befindlicher Fahrerassistenzsysteme, wie beispielsweise Tote-Winkel-Erkennung, Automatische Notbremse oder Nachtsicht-Unterstützung, nutzen eine breite Palette zusätzlicher Sensoren wie Videokameras, Ultraschall und Radar, deren Daten mittels Sensorfusion in einer umfassenden Umfeldsensorik auch bereits bekannten Systemen Funktionserweiterungen ermöglichen werden (BOSCH 2004, [120], Ehmanns et al. 2000, [38]).

Ansatz der vorliegenden Arbeit ist es, auf Basis der zukünftig im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Größen, in stationären, eingeschwungenen Folgefahrtsituationen unter der besonderen Berücksichtigung von Witterungsbedingungen ein Referenzverhalten von Fahrzeugführern zu beschreiben. Dies ist die Grundlage für eine situations- und witterungs-adaptive Anpassung von Fahrerassistenzsystemen, die neben einem Komfortgewinn für den Fahrer auch mit einer Erhöhung der Sicherheit einhergehen kann. So ist zum Beispiel aus Untersuchungen bekannt, dass Fahrer größere Zeitlücken von ACC im Vergleich zur manuellen Fahrt akzeptieren und diese sogar selbst am System einstellen (vgl. Fanher [40]).

Die vorliegende Arbeit basiert auf den Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes S.A.N.T.O.S (**S**ituations-**a**ngepasste und **N**utzer-**T**yp-zentrierte **O**ptimierung von **S**ystemen zur Fahrerunterstützung) durchgeführt wurden, einer Kooperation zwischen der Industrie und sechs Universitätsinstituten, zur Hälfte gefördert durch das BMBF. Dort erfolgte eine Anpassung von Systemparametern der Adaptive Cruise Control an Witterungsbedingungen. So wurden mit zunehmender Nässe und Regen die Sollzeitlücke erhöht und die dynamischen Parameter wie maximale Verzögerung, maximale Beschleunigung sowie jeweils deren Aufbau reduziert und somit das Systemver-

halten Richtung „träge“ geändert. Dabei konnten Tendenzen aufgezeigt werden, dass Fahrer eine solche Anpassung des ACC an Witterungsbedingungen wünschen und sie dem adaptiven System gegenüber hohe Akzeptanz zeigen. Einige Probanden attestierten dem System darüber hinaus subjektiv einen zum Teil großen Sicherheitsgewinn, so dass einer Systemanpassung an Witterungsbedingungen ein großer Nutzen zugeschrieben werden kann (König et al. 2004, [79]).

2 Stand der Forschung

2.1 Methoden und Definitionen

Die bislang veröffentlichten Beiträge zum längsdynamischen Fahrerverhalten bei unterschiedlichen Witterungen unterscheiden sich stark bezüglich der Untersuchungsmethodik. Nach Kaeppler [74] stehen fünf grundsätzliche Ansätze zur Verfügung, die sich nach den gegenläufigen Dimensionen „Realismus“ und „Kontrollierbarkeit“ ordnen lassen. Im Einzelnen sind dies:

- Beobachtung,
- Versuchsfahrzeug,
- Fahrsimulation,
- Laborexperiment,
- mathematische Modelle.

Experimentelle Methoden unterteilen sich nach Leutzbach [81] in dynamische Untersuchungen mit Versuchspersonen in einem realen Versuchsfahrzeug oder im Fahrsimulator und in statische Untersuchungen, bei denen Fahrer an einem ortsfesten Punkt beobachtet werden. Bei Verkehrsbeobachtungen kann das reale Fahrerverhalten mit entsprechender Messtechnik sehr genau erfasst werden, allerdings bleiben die beobachteten Fahrer, deren persönliche Voraussetzungen und Fahrtmotive unbekannt. Darüber hinaus können Umgebungseinflüsse nur aufwendig durch Beobachtung an mehreren Orten variiert werden. Experimentelle Untersuchungen mit Versuchsfahrzeugen zeichnen sich zwar ebenfalls durch hohe Realitätsnähe aus, sind aber, bedingt durch das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer und die Zufälligkeit der einwirkenden Einflüsse, nur bedingt

kontrollierbar. In Simulatoren lassen sich Situationen hingegen gezielt einstellen, dafür bilden sie sowohl Fahrzeug als auch Umwelt nur unvollkommen ab. Fahrermodelle eignen sich als Prognosewerkzeuge für das Fahrerverhalten, wobei Schuller et al. [131] darauf hinweisen, dass die in realen Versuchen ermittelten Modellparameter nicht als repräsentativ für das reale Fahrerverhalten angesehen werden können, da sie bereits eine Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse darstellen.

Neben unterschiedlichen Methoden definieren die Autoren darüber hinaus den Begriff „Situation“ unterschiedlich. Fastenmeier [42] teilt die kontinuierlichen Interaktionen des Systems Fahrer-Fahrzeug und seiner sich permanent ändernden Umwelt in räumlich und zeitlich abgrenzbare Einheiten ein, denen jeweils ein spezifisches Fahrerverhalten zugeordnet werden kann. Die Beschreibung erfolgt aus Fahrersicht und wird von ihm demzufolge „Fahrersituation“ genannt. Weiterhin unterteilt er diese in freien und gebundenen Verkehr und ordnet dem freien Verkehr die Situationen „freies Fahren“ und „freies Überholen“ sowie dem gebundenen Verkehr die Situationen „Hinterherfahren“, „Hinterherfahren beim Überholen“, „Kolonnenfahren“ und „Stop-and-Go“ zu. Als Schwellwert zwischen freiem Fahren und gebundenem Verkehr legt er eine Zeitlücke von 2s fest, Stop-and-Go-Verkehr liegt seiner Auffassung nach bei Kolonnenverkehr unterhalb 30 km/h vor. Eine andere, stark beobachtungsgeprägte Einteilung nehmen Leutzbach [81] und Koessler [78] vor. Sie unterscheiden neben freiem und gebundenem zusätzlich in den teilgebundenen Verkehr, der sich dadurch auszeichnet, dass andere Verkehrsteilnehmer die eigene Geschwindigkeitswahl zwar beeinflussen, allerdings freie Überholmöglichkeiten bestehen. Die Entscheidung über die tatsächlich vorliegende Situation treffen sie anhand prozentualer Anteile der in der Wahl ihrer Geschwindigkeit beeinflussten Fahrer, bei Durchfahrt der Beobachtungsstrecke. Sakata et al. [125] trennen Situationen danach, ob sich der Fahrer als „Folger“ oder „Führer“ bewegt, wobei letzterer einen so großen Abstand zum voraus Fahrenen besitzt, dass angenommen werden kann, dass er nicht beeinflusst wird. Nirschl [106], der im Wesentlichen der Situationsklassifikation nach Fastenmeier folgt, stellt durch Untersuchungen auf einem rund 190km langen Autobahnabschnitt fest, dass sich Fahrer zu über 80% der Fahrzeit in freier Fahrt oder Folgefahrt befinden. Dynamische Situationen, d.h. die Übergänge zwischen freier und gebundener Fahrt, weisen einen Zeitanteil von etwa 10-20% auf.

Grundsätzliche Schwierigkeit bei der Untersuchung des Einflusses von Witterungsbedingungen ist die Definition des Begriffs „Nässe“. Eine Festlegung anhand eines Schwellwertes für den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn ist grundsätzlich zwar möglich, führt jedoch zu einer Vermischung der Effekte aus Wasserfilmdicke, Geschwindigkeit, Reifenzustand und Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche. Darüber hinaus ist der Reibwert eine dem Fahrer nicht absolut bekannte Größe, über deren relative

Änderung er nur durch Symptome erfährt, wie sich ändernder Schwimmwinkel, änderndes Lenkradrückstellmoment bei Kurvenfahrt oder sich änderndes Schlupfverhalten beim Antreiben und Bremsen bei Niedrigreibungswerten. Einen Ansatz zur Einstufung des Nässezustandes bietet Hiersche [64], der die Witterungsbedingungen anhand von Feuchtigkeitsklassen definiert, worauf im Weiteren noch näher eingegangen wird. Einige Forscher spezifizieren in der Beschreibung ihrer Versuchsergebnisse zum Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten die zugrunde liegenden Witterungsverhältnisse allerdings in variierenden, nicht exakt abgegrenzten Ordinalskalen (vgl. Bubb [19]), mit Klassen wie „Regen“, „Fahrbahnnässe“ oder „eingeschränkte Sicht“ (Felke, zit. in [67], Hawkins [61]).

2.2 Längsdynamisches Fahrerverhalten

Im Weiteren werden die bisher veröffentlichten Untersuchungserkenntnisse zum längsdynamischen Fahrerverhalten nach einzelnen Verkehrssituationen analysiert. Dabei stehen insbesondere die Ergebnisse zu witterungsbedingten Abhängigkeiten im Mittelpunkt, die Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind.

2.2.1 Freie Fahrt

Gemäß obiger Definition versteht man unter einer freien Fahrt die nicht durch andere, vorausfahrende Fahrzeuge beeinflusste Fortbewegung von Kraftfahrzeugen (vgl. Witte [149]). Dabei kann der Fahrer des frei fahrenden Fahrzeugs seine Geschwindigkeit unbeeinflusst durch andere Fahrzeuge wählen. Darüber hinaus können Witterungsbedingungen, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Straßenkrümmungen die Geschwindigkeitswahl beeinflussen. Als experimentelle Methoden wurden in einigen Untersuchungen stationäre Geschwindigkeits- und Witterungsmessungen verwendet und in anderen Messungen im Fahrsimulator durchgeführt.

2.2.1.1 Stationäre Verkehrsbeobachtung

Durch stationäre Geschwindigkeitsmessung zeigte Felke (1974, zit. in [67]), dass bei Regen eine deutliche Abnahme des Anteils von Geschwindigkeiten über 130km/h im Vergleich zu regenfreien Verhältnissen auftritt. Dies konnte jedoch bei nasser Fahrbahn ohne Regen nicht bestätigt werden. Nach seiner Auffassung sind für die Geschwindigkeitsreduktion vielmehr die eingeschränkten Sichtbedingungen verantwortlich als die reine Nässe der Fahrbahn.

Köppel und Bock (1979, zit. in [77]) untersuchten die v_{85} -Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Witterungsbedingungen und stellten bei stärkerem Regen einen Rückgang um rund 20km/h im Vergleich zur Trockenheit fest.

Auf einer dreistreifigen Autobahn führte Hawkins (1988, [61]) Geschwindigkeitsmessungen durch und kam zum Ergebnis, dass die Fahrer bei Sprühregen auf dem rechten und mittleren Fahrstreifen ihre Geschwindigkeit um 4km/h, auf dem linken Fahrstreifen um 6km/h reduzieren.

Den Einfluss von nassen Fahrbahnen ohne Regen auf die Wahl der Geschwindigkeit untersuchten Durth, Biedermann und Vieth (1983, zit. in [77]). Sie konnten zeigen, dass die v_{50} -Geschwindigkeit bei nasser Fahrbahn um 3 bis 11km/h gegenüber trockener Fahrbahn reduziert wird. Die v_{85} -Geschwindigkeit sinkt unter gleichen Bedingungen um 1 bis 9km/h. Weitere Forscher (Kolsrud 1984, Leutzbach und Egert 1960, Walgren 1963, Zuberbühler 1965 und Keller 1978, zit. in [77]) weisen Geschwindigkeitsreduktionen bei Nässe im Vergleich zur Trockenheit von 1 bis 9km/h aus.

Scharsching (1988, [128]), der auf einer österreichischen Autobahn ortsfest Geschwindigkeits-, Regenintensitäts- und Wasserfilmdickenmessungen durchführte, kommt zu dem Ergebnis, dass im untersuchten Bereich der Wasserfilmdicke bis 1mm eine annähernd lineare Geschwindigkeitsreduktion um ca. 20km/h stattfindet. Noch deutlicher zeigt sich die Reduktion über der Regenintensität. Hier fallen die Geschwindigkeiten fahrestreifenabhängig zwischen 0 und 3mm Regen pro 75 Sekunden links um bis zu 50km/h, auf dem mittleren Fahrstreifen um bis zu 35km/h und rechts bis zu 25km/h. Bei 3mm Niederschlag pro 75 Sekunden pendeln sich die Geschwindigkeiten auf allen Fahrstreifen bei etwa 50km/h ein. Auch Scharsching weist darauf hin, dass die Fahrer auf die sich verschlechternden Sichtbedingungen bei Regen wesentlich stärker reagieren als auf reine Fahrbahnnässe.

Zur Beurteilung des Einflusses nasser Fahrbahnen führte Hiersche (1989, [64]) eine umfangreiche Untersuchung mit Einsatz eines konduktometrischen Messverfahrens für die Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn durch. Er unterteilt fünf Feuchtigkeitsklassen (FK0-4) mit zunehmender Wasserfilmdicke. Die Untersuchung auf einer Bundesstraße mit einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung zeigt mit zunehmender Fahrbahnnässe abnehmende Geschwindigkeiten von 5km/h zwischen FK0 (trocken) und FK2 (Nässe noch unterhalb des Bezugsniveaus (Mitte zwischen Rauigkeitsspitzen), 1,5km/h zwischen FK2 und FK3 (oberhalb Bezugsniveau aber unterhalb Spitzen) und 1km/h zwischen FK3 und FK4 (Wasserfilm geschlossen oberhalb Spitzen). Die Auswertung der parallel aufgezeichneten Regenintensität (Regenintensitätsklassen – RK0-4) ergibt, dass die v_{85} -Geschwindigkeit mit 10,5km/h am deutlichsten zwischen Regenfreiheit (RK0) und schwerem Regenguss (RK3, Niederschlag 0,3-0,833mm/Min) reduziert wird. Bei Wol-

kenbrüchen (RK4, Niederschlag $>0,833\text{mm/Min}$) liegt die v_{85} -Geschwindigkeit hingegen wieder um rund 3km/h höher als bei RK3. Somit weist Hiersche ebenfalls einen größeren Einfluss von Regen als von Fahrbahnnässe auf das Geschwindigkeitsverhalten nach.

Unter der Nutzung der Feuchtigkeits- und Regenklassendefinitionen von Hiersche führte Knepper (1992, [77]) Untersuchungen bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen durch und kam zu dem Ergebnis, dass bei Dunkelheit auf trockener Fahrbahn rund $3,5\text{km/h}$ schneller gefahren wird als bei Helligkeit. Auf nassen Fahrbahnen werden hingegen bei Dunkelheit um $3,2\text{km/h}$ niedrigere Geschwindigkeiten gefunden als bei Helligkeit. Knepper führt dies darauf zurück, dass die Fahrer bei Kombination aus Nässe und Dunkelheit subjektiv eher eine Gefährdung empfinden.

Hoffmann (1984, [67]) untersuchte das Geschwindigkeitsverhalten in Abhängigkeit von Witterung und Lichtverhältnissen in ortsfesten Beobachtungen auf einer auf 100km/h limitierten und einer nicht limitierten Autobahn. Ergebnis seiner Analyse ist, dass die Fahrer auf der limitierten Autobahn die mittlere Geschwindigkeit um $10,6\text{km/h}$ bei Nässe und Regen reduzieren. Am Beobachtungspunkt ohne Tempolimit werden Geschwindigkeitsreduktionen unter gleichen Bedingungen von $29,8\text{km/h}$ je nach Fahrstreifen gefunden, die sich jedoch auf eine höhere Geschwindigkeit bei Trockenheit zurückführen lassen. Auf unterschiedliche Lichtverhältnisse reagieren die von ihm untersuchten Fahrer kaum, obgleich sich hierzu in der Literatur gegensätzliche Darstellungen finden lassen. Die in Knepper ([77]) zitierten Herd, Brühning und Müller können in Ihren Untersuchungen keine Abhängigkeit der Geschwindigkeitswahl von den Lichtverhältnissen finden. Pfundt (ebenfalls zitiert in [77]) findet jedoch eine höhere Geschwindigkeit bei Dunkelheit, führt dies allerdings auf die geringere Verkehrsdichte bei Nacht zurück. Auch Lamm und Schlichter (zit. in [128]) finden diesen Zusammenhang. Im Gegensatz hierzu weisen Heidemann (zit. in [128]) und die in Knepper ([77]) zitierten Mayer, Wimber, Köppel und Bock bei Dunkelheit niedrigere Geschwindigkeiten aus.

In einer ortsfesten Untersuchung von Mitsch (1986, [94]) zum Einfluss von Seitenwind auf die Geschwindigkeitswahl wurden ebenfalls Licht- und Witterungsverhältnisse aufgezeichnet. Er stellt fest, dass auf allen Fahrstreifen einer dreistreifigen österreichischen Autobahn bei Dunkelheit im Durchschnitt um 5km/h schneller gefahren wird als bei Helligkeit. In Kombination mit Regen zeigt sich der von Knepper [77] ebenso beschriebene Effekt einer größeren Reduktion der Geschwindigkeit bei Dunkelheit (um $20,0\text{km/h}$) im Vergleich zur Reduktion bei Tage (um $8,2\text{km/h}$, jeweils bezogen auf den linken Fahrstreifen).

1986 wurden von Habermehl [52] die Auswirkungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen untersucht. Nach der Limitierung von drei ursprünglich unbe-

schränkten Autobahnabschnitten auf 100 bzw. 130km/h, zeigte sich, dass sich nur 40-60% der Fahrer an das Tempolimit halten. Allerdings fahren nur sehr wenige Fahrer wesentlich schneller als erlaubt. Durch das Tempolimit wird eine erhebliche Reduktion der Geschwindigkeiten erreicht, begleitet von einer deutlichen Homogenisierung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverteilung.

In einer Untersuchung des Einflusses von Geschwindigkeitsbegrenzungen von Kang [75] wurde eine pro Fahrtrichtung vierstreifige Autobahn in Korea auf 70km/h begrenzt. Insgesamt durchfuhren die 1,2km lange Messstrecke 2889 Fahrzeuge, deren Fahrer zu rund einem Drittel an einer nachfolgenden Ampel zu ihrer Fahrerfahrung, Sicherheitsausstattung ihres Fahrzeuges, der Gesamtfahrdauer, dem Bekanntheitsgrad der Strecke und persönlichen Verhältnissen befragt wurden. Es zeigte sich, dass Fahrer das Tempolimit umso eher einhalten, je größer ihren Angaben zu folge die Furcht ist, bei einer Geschwindigkeitskontrolle aufzufallen. Männer, insbesondere mit höherem Einkommen, fahren schneller als Frauen. Die Wahl der Geschwindigkeit steigt tendenziell mit der Fahrerfahrung und der Motorleistung, und sie sinkt mit dem Grad der Sicherheitsausstattung des Fahrzeuges und mit der Bekanntheit der Strecke.

2.2.1.2 Untersuchungen im Fahr Simulator

Zur Wahl der Geschwindigkeit bei freier Fahrt finden sich nur sehr wenige Untersuchungen. Dies verwundert nicht, da diese Situation insbesondere auf kurvenarmen Abschnitten durch besonders hohe Parameterfreiheit gekennzeichnet ist, deren Einflussfaktoren auf die Wahl der Geschwindigkeit im Simulator nur schwierig nachgebildet werden können.

In einem Simulatorexperiment untersuchte Schreiner [130] das Geschwindigkeitsverhalten von Fahrern in Abhängigkeit von der Straßenkrümmung. Auftrag der insgesamt 15 Versuchspersonen war es, so zu fahren, wie sie es für angenehm hielten. Der Versuch wurde zur Analyse intraindividuelle Unterschiede im Abstand von drei Monaten wiederholt. Es zeigte sich sowohl intra- als auch interindividuell stark unterschiedliches Geschwindigkeitsverhalten in Abhängigkeit von der Straßenkrümmung. Schreiner vermutet hierfür intrinsische Faktoren sowie Lerneffekte.

2.2.1.3 Modelle und Regelkreisbeschreibungen

Die Literatur weist eine Vielzahl an theoretischen Modellen aus, welche die Geschwindigkeitswahl freifahrender Fahrzeugführer beschreiben.

Witte [149] geht in seinem Fahrermodell davon aus, dass der Fahrer die Wahl seiner Geschwindigkeit vor allen vom Streckenverlauf, d.h. von Straßenführung und Geschwindigkeitsbegrenzungen, sowie vom Leistungsvermögen des Fahrzeuges oder von persönlichen Komfort- und Sicherheitsbedürfnissen abhängig macht. Weitere Autoren (Dreyer [34], Leutzbach et al. [81]) beschreiben, dass die Fahrer ihre Geschwindigkeit vorwiegend nach der resultierenden Querschleunigung wählen.

Das Modell von Yap [153] basiert auf der Annahme, dass Fahrer in Abhängigkeit von persönlichen Voraussetzungen und Witterungsbedingungen einen maximalen Wert der Querschleunigung akzeptieren. Die Abweichung zwischen der Ist-Geschwindigkeit und der vom Fahrer unter obiger Prämisse angestrebten Soll-Geschwindigkeit regelt er durch eine stark vom eigenen Fahrstil abhängigen Längsbeschleunigung aus.

Das von Yoshimoto (zit. in [143]) entwickelte „Self-Paced-Model“ basiert ebenfalls auf der Annahme, dass Fahrer eine selbst festgelegte Querschleunigung und darüber hinaus eine bestimmte Geschwindigkeit nicht überschreiten wollen. Unter diesen Bedingungen fahren sie dann jedoch so schnell wie möglich.

Einen zur reinen Betrachtung der Querschleunigung erweiterten Ansatz verfolgen Suetomi et al. (1985 zit. in [125]). Sie entwickelten ihr Modell unter der Annahme, dass Fahrer ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Schwierigkeit der bevorstehenden Lenkungsaufgabe wählen und nennen es „self-pacing preview tracking control model“.

Bösch (1991, zit. in [143]) bildet in seinem Geschwindigkeitsmodell komplexere Einflüsse wie Sichtweiten und Tempolimits nach.

Durth (1984, zit in [123]) legt seinem Modell zu Grunde, dass Fahrer ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der sichtbaren Fläche des vor ihnen liegenden, eigenen Fahrstreifens einstellen. Diese ist eine Funktion von Kurvenradius und Fahrbahnbreite.

Einen teilweise psychologischen Ansatz wählt Hartwich [59]. Neben äußeren Faktoren wie Witterung und Fahrbahnzustand berücksichtigt er innere, dem Fahrer zuzuordnende Größen wie Aggressivität und gewünschter Fahrkomfort bei der Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens.

Bald [5] beschreibt mit seinem Modell die Anpassung der momentanen Geschwindigkeit an die vom Fahrer gewünschte Soll-Geschwindigkeit durch Gasgeben und Bremsen.

Jürgenssohn und Raupach (zit. in [4]) wenden zur Beschreibung der Geschwindigkeitswahl eine Fuzzy-Regelung an.

2.2.1.4 Fazit

Die in der Literatur aufgezeigten Untersuchungsergebnisse weisen große Unterschiede hinsichtlich der gefundenen absoluten Geschwindigkeiten unter den analysierten Bedingungen auf. Bei Variation von Witterungsbedingungen werden Änderungen der statistischen Größen des Geschwindigkeitsverhaltens angegeben, die fast durchgängig in die gleiche Richtung zeigen, sich in ihren Beträgen allerdings dennoch unterscheiden. Es ist zu lesen, dass Fahrer bei Trockenheit im Mittel die höchsten Geschwindigkeiten erzielen und diese dann bei Regen stärker reduzieren als bei reiner Fahrbahnnässe. Die meisten Forscher (vgl. Felke, Hiersche, Scharsching) leiten daraus ab, dass die Fahrer insbesondere auf ungünstige Sichtverhältnisse reagieren und der Einfluss der reinen Nässe eher untergeordnet ist. Zum Einfluss der Lichtverhältnisse liefert die Literatur gegensätzliche Darstellungen. In der Kombination aus Dunkelheit und Nässe zeigt sich jedoch eine deutliche Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeiten.

Bei den experimentellen Versuchen handelt es sich überwiegend um stationäre Verkehrsbeobachtungen, die keine Aussage über Fahrereigenschaften und –motivationen erlauben. Simulatorversuche zur Ermittlung des Geschwindigkeitsverhaltens von Fahrern bei freier Fahrt finden sich kaum, was nicht verwundert, legt man die Parameteroffenheit dieser Situation und die begrenzten Möglichkeiten der Rückmeldung an den Fahrer im Simulator zu Grunde. Auch eine Untersuchung der Geschwindigkeitswahl unter Variation der Witterungsbedingungen mit einer On-Board-Messung findet sich in der zur Verfügung stehenden Literatur nicht.

2.2.2 Übergangssituationen

Der Übergang von freier zur gebundenen Fahrt kann durch Annäherung an ein voraus fahrendes Fahrzeug oder durch das Einscheren eines Fahrzeuges von anderen Fahrstreifen in den eigenen erfolgen. Von der daraus resultierenden Folgefahrt führen das Ausscheren des voraus Fahrenden auf einen anderen Fahrstreifen oder der eigene Wechsel auf einen benachbarten Streifen zur freien Fahrt zurück. Diese dynamischen Situationen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Es liegen zahlreiche Untersuchungen und theoretische Abhandlungen vor, die das Fahrerverhalten in Annäherungs- (vgl. Chen [25], Feraric et al. [45], Filzek [49], Hayafune [62], Hoefs [66], Leutzbach et al. [82], MacAdam et al. [87]), Einschere- (Filzek [49], Hayafune [62]) und Spurwechselsituationen (Fastenmeier [44], Kita [76], Koessler [78], Leutzbach et al. [82], Piske et al. [109]) beschreiben. Untersuchungen zur Ausschersituation zeigt die Literatur nicht auf. Hinweise auf Witterungsabhängigkeiten in diesen Situationen finden sich in der Literatur ebenfalls nicht.

2.2.3 Folgefahrt

Unter einer Folgefahrt wird das Folgen hinter einem Führungsfahrzeug verstanden, wobei Fastenmeier [44] hierfür eine Folgezeitlücke von unter 2 Sekunden angibt. Dieser Schwellwert stellt eine hinreichende aber nicht notwendige Bedingung für Folgefahrten dar. Insbesondere in Niedriggeschwindigkeitsbereich wird das betrachtete Fahrzeug in seiner Geschwindigkeitswahl auch bei größeren Zeitlücken durch die Geschwindigkeit des voraus Fahrenen beeinflusst. Es kann jedoch seinen Abstand unter Beachtung weiterer Randbedingungen frei wählen. Breitenstein (1980, zit. in [67]) gibt an, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen voraus Fahrendem und Folgendem nicht größer als 10% der Führungsgeschwindigkeit sein darf.

Nach Ansicht von Dreyer [34] und Hartwich [59] richten sich Fahrer bei der Wahl des Folgeabstandes nach dem Ist-Abstand, der Relativgeschwindigkeit und der gefahrenen absoluten Geschwindigkeit. Newcomb [103] geht davon aus, dass geübte Fahrer die Relativgeschwindigkeit ziemlich genau schätzen können. Dies folgert er aus einer eigenen Untersuchung, die zeigt, dass Fahrer die Relativgeschwindigkeit auf 2,5m/s genau angeben konnten. Chandler et al. (1997, zit. in [2]) zeigten jedoch, dass Fahrer auf Geschwindigkeitsänderungen des voraus Fahrenen mit einer Totzeit von etwa 1,5 Sekunden reagieren. Torf und Duckstein (1966, zit. in [2]) finden darüber hinaus einen Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Beschleunigung des Führungsfahrzeuges der Art, dass diese pro $0,3\text{m/s}^2$ um 0,8s abnimmt.

Bubb und Reichart (1992, [17]) beschreiben, dass die Fähigkeit des Menschen, Entfernungen in einem bewegten System abzuschätzen und Abstände geschwindigkeitsabhängig einzunehmen, sehr schlecht ausgeprägt sei. Vielmehr werde der gewählte Abstand davon beeinflusst, welches Risiko der Fahrer aufgrund seiner persönlichen Voraussetzungen einzugehen bereit sei.

2.2.3.1 Stationäre Verkehrsbeobachtung

Frischer (1996, [50]) führte eine Untersuchung auf einer österreichischen, pro Fahrtrichtung zweistreifigen Autobahn mittels Videokamera auf einer Brücke durch und verglich die gefahrenen Zeitlücken auf beiden Fahrstreifen. Er fand bei nasser Fahrbahn eine deutlich geringere relative Häufigkeit an Zeitlücken unterhalb einer Sekunde im Vergleich zur Trockenheit, die auf dem linken Fahrstreifen noch niedriger war als rechts. Im Gegenzug nehmen die relativen Häufigkeiten von Zeitlücken zwischen einer und vier Sekunden auf beiden Streifen deutlich zu. Müller (1981, zit. in [77]) findet in seinen Untersuchungen nur geringfügige Änderungen des Abstandsverhaltens zwischen Trockenheit und Regen.

Hoffmann (1984, [67]) führte an einer Messstelle auf einer deutschen Autobahn umfangreiche Dauermessungen durch und kommt zu dem Ergebnis, dass selbst zwischen den extremen Bedingungen „trocken, hell“ einerseits und „Regen, dunkel“ keine signifikanten Unterschiede in den Zeitlücken nachzuweisen waren. Da allerdings die mittlere Geschwindigkeit bei Regen deutlich niedriger ist als bei Trockenheit, liegt seiner Untersuchung zufolge ein erhöhter absoluter Abstand zugrunde.

Hawkins (1988, [61]) analysierte das Abstandsverhalten von Fahrzeugführern bei Sichtbehinderung durch Nebel auf einer pro Fahrtrichtung dreistreifigen Autobahn in Großbritannien. Er stellt fest, dass der Anteil an Zeitlücken unterhalb 2 Sekunden mit abnehmender Sichtweite zunimmt. Er führt dies darauf zurück, dass die Fahrer an den Rücklichtern der voraus Fahrenden Orientierung suchen.

Einer Untersuchung von van Toorenburg (1982, zit. in [77]) auf einer niederländischen Autobahn zufolge erhöhen die Fahrer die Zeitlücke bei Regen um 10-15% gegenüber trockenen Verhältnissen.

Unter zu Hilfenahme der Feuchtigkeits- und Regenklassendefinition von Hiersche (vgl. Kapitel 2.2.1.1) untersuchte Knepper [77] das Abstandverhalten in Folgefahrtsituationen bei zunehmender Straßennässe und Regen. Seine Ergebnisse zeigen, dass Fahrer mit zunehmender Straßennässe mit größeren Abständen reagieren. Die Änderungen gegenüber trockener Fahrbahn sind jedoch klein. Bei sehr starkem Regen (RK4) vergrößern die Fahrer ihren Abstand im Vergleich zu schwachem Regen (RK1) nicht weiter.

Pfundt (1969, zit. in [67]) stellte fest, dass auf Autobahnen der Anteil an geringen Zeitlücken (unter 2s) mit zunehmenden mittleren Geschwindigkeiten deutlich sinkt. Dies bestätigt auch Sumner (1978, ebd.). Bei Nacht ist dieser Einfluss auf beleuchteten Autobahnen stärker zu verzeichnen als bei Tage. Im Gegensatz hierzu ist diese Anteilsreduktion auf unbeleuchteten Autobahnen unabhängig von den Lichtverhältnissen.

2.2.3.2 Untersuchungen im realen Straßenverkehr

Fancher et al. (1998, [40]) führten Langzeit-Vergleichsuntersuchungen mit 108 Versuchspersonen im amerikanischen Alltagsverkehr durch. Die Fahrer konnten das Versuchsfahrzeug für zwei bis fünf Wochen im Alltagsbetrieb fahren. Dabei war ihnen freigestellt, das vorhandene ACC (ohne Bremseneingriff) zu nutzen oder nicht. Bei manueller Fahrt ohne ACC fuhren die Versuchspersonen im Durchschnitt eine Zeitlücke von 0,8s. Zeitlücken kleiner als 0,6s traten immerhin in über 6% der Zeit auf. Mit ACC, dessen Beurteilung nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, reduziert sich der Anteil sehr kleiner Zeitlücken unter 0,8s deutlich, und es werden Häufungen bei den einstell-

baren Wunschzeitlücken 1,1, 1,5 und 2,1s gefunden. Eine Analyse nach Witterungsbedingungen fand nicht statt.

Allen et al. (1997, [2]) untersuchten das Abstandsverhalten im Vergleich zwischen einer abgesperrten Teststrecke und öffentlichem Straßenverkehr in den USA. Ihre Ergebnisse zeigen bezüglich der Zeitlückenwahl große interindividuelle Streuung. Als durchschnittliche Zeitlücken werden für die Teststrecke 1,35s und für die öffentliche Straße 1,22s ermittelt.

Im Gegensatz zu Pfundt und Sumner (vgl. Kapitel 2.2.3.1) fand Becker (1997, [6]) in Fahrversuchen auf deutschen Autobahnen, dass Fahrer mit zunehmender Geschwindigkeit geringere Zeitlücken bei sich vergrößerndem Abstand wählen, so dass sich der Abstand bei höheren Geschwindigkeiten nur noch gering erhöht. Die mit der Geschwindigkeit interindividuell steigende Varianz führt er auf jeweils unterschiedliches Sicherheitsempfinden der Fahrer zurück.

Diese Ergebnisse bestätigt auch Steck (1991, [134]), der den nachfolgenden Verkehr mit einem Radarmessgerät untersuchte. Dabei konnte er nachweisen, dass die sich unbeobachtet fühlenden Fahrer mit zunehmender Geschwindigkeit die Folgezeitlücke zum Teil dramatisch verkleinern. Er findet im Bereich bis 80km/h eine durchschnittliche Zeitlücke von 1,36s. Zwischen 80 und 130km/h gibt er einen durchschnittlichen Wert von 0,82s und über 150km/h nur noch 0,56s an. Darüber hinaus stellt auch er fest, dass die Fahrer bei hohen Geschwindigkeiten den absoluten Abstand nicht weiter vergrößern. Die Analyse nach Lichtverhältnissen ergibt, dass die Fahrer bei Dunkelheit ihren Abstand nicht signifikant vergrößern. Die leicht steigende Zeitlücke bei Dunkelheit beruht nach seinen Angaben auf einer Reduktion der Geschwindigkeit. Stärker reagieren die Fahrer auf Nässe. Hier erhöhen sie den Abstand signifikant. Ebenso wird eine Erhöhung der Folgezeitlücken gefunden.

Hayafune (1994, [62]) zeigte in seinen Fahrversuchen eine zur Geschwindigkeit proportionale Wahl des Abstands. Die dabei auftretenden Folgezeitlücken liegen hier zwischen 0,7 und 1,4s. Dreyer [35] findet in seinen Folgeversuchen auf Stadt- und Autobahnabschnitten einen leicht degressiven Zusammenhang ($v^{0,84}$) zwischen Geschwindigkeit und Abstand. Im innerstädtischen Verkehr liegen die Zeitlücken bei 0,7 – 0,8s.

Fastenmeier (1998, [44]) führte Fahrversuche zur Ermittlung des Abstandsverhaltens auf Ringstraßen in Stadtbereichen durch. Er zeigt mit 25 Versuchspersonen eine oberhalb von 10m/s von der Geschwindigkeit weitgehend unabhängige Wahl der Zeitlücke. Unterhalb dieser Schwelle findet er eine leichte Tendenz zu größeren Zeitlücken bei sinkenden Geschwindigkeiten.

2.2.3.3 Untersuchungen im Fahrsimulator

In einem Simulatorversuch von Schreiner ([130], vgl. Kapitel 2.2.1.2) hatten die Versuchspersonen auf einer autobahnähnlichen Fahrbahn den Auftrag einem Führungsfahrzeug ohne Überholmöglichkeit zu folgen. Die Ergebnisse zeigen bei allen Fahrern etwa gleiches Abstandsverhalten und dies auch bei der Wiederholung des Versuchs nach drei Monaten. Schreiner findet einen progressiven Verlauf des Abstandes über der Geschwindigkeit, der im Vergleich zu realen Fahrversuchen erheblich höhere Abstandswerte liefert. Er begründet dies mit der Neigung der Fahrer, Abstände im Simulator zu unterschätzen. Auch Sakata et al. (1989, [125]) finden in ihren Simulatorversuchen mittlere Zeitlücken zwischen 3,3 und 4,1s. Sie führen dies auf die Reizarmut, die idealisierten Bedingungen im Simulator und die mangelnde Bildqualität zurück.

Chen (1992, [25]) untersuchte im Fahrsimulator den Einfluss von Nebel und Vereisungen auf der Fahrbahn. Er gibt an, dass Fahrer bei Nebel im Vergleich zur klaren Sicht den Abstand um den Faktor 1,3-1,8 vergrößern. Vereiste Fahrbahnen führen ihm zu Folge zu einer Erhöhung um den Faktor 1,23. Mitschke (1989, [97]) untersuchte darüber hinaus das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten mit dem Ergebnis, dass die Versuchspersonen stärker verzögern, aber schwächer beschleunigen als das Führungsfahrzeug.

Apel (1998, [4]) führte mit einem Kollektiv von 32 Versuchspersonen eine Simulatoruntersuchung zum Abstandsverhalten mit zwei „Fahrzeugen“ unterschiedlicher Leistungsklasse durch. Ihr Auftrag war es, einem Führungsfahrzeug zu folgen, das abschnittsweise mit vier unterschiedlichen Geschwindigkeiten voraus fuhr. Es zeigen sich hinsichtlich des Abstandsverhaltens zwischen den beiden Fahrzeugen keine signifikanten Unterschiede. Apel führt dies darauf zurück, dass die Fahrer die unterschiedlichen Fahrzeugeigenschaften bei der Regelung des Abstandes kompensieren. Im Durchschnitt wählen die Probanden eine Zeitlücke von 1,8s.

2.2.3.4 Modelle und Regelkreisbeschreibungen

Zur Beschreibung des Abstandsverhaltens finden sich in der Literatur etliche Fahrermodelle, die nach Witte [149] dazu dienen, das Folgeverhalten von Fahrern, deren gewünschte Geschwindigkeit über der des voraus Fahrenen liegt, mathematisch und regelungstechnisch abzubilden. Sie dienen häufig dazu, Aussagen über Kolonnenstabilität oder über den makroskopischen Verkehrsfluss zu erhalten.

Die interindividuellen Unterschiede zwischen realen Fahrern werden in den linearen Modellen von Dreyer [34], Fiala [47], Hoefs [66], Hartwich [59] und Leutzbach [82] durch Sensitivitätskonstanten berücksichtigt.

Nichtlineare Modellansätze (vgl. Herman et al. zit. in [81], Mitschke [97]) berücksichtigen darüber hinaus nichtlineare Eigenschaften des menschlichen Fahrers und liefern meist höhere Validierungsqualitäten, jedoch bemängeln Leutzbach [83] und Hoefs [66], dass die menschlichen Wahrnehmungsschwellen und antizipatorische Fähigkeiten in ihnen nicht abgebildet werden.

Todosiev (1963, zit. in [83], [143]) beschreibt Wahrnehmungsschwellen für Geschwindigkeitsdifferenzen und leitet daraus das „Action-Point-Model of the Driver Vehicle System“ ab, wonach Fahrer in Folgefahrt um einen Wunschabstand pendeln und Verhaltensänderungen (Beschleunigen, Verzögern) nur an den Punkten einer wahrgenommenen Geschwindigkeitsänderung zuzüglich Reaktionszeit auftreten.

Witte (1996, [149]) entwickelte ein auf den Todosiev'schen Aktionspunkten basierendes Fahrermodell, das über die bekannten Wahrnehmungsschwellen hinaus auch variierende Aufmerksamkeit des Fahrers und die Beachtung des vorvorausfahrenden Fahrzeuges bei Kolonnenfahrt berücksichtigt. An den Aktionspunkten wählt der Fahrer sprunghaft eine Beschleunigung, die auf einer Linearkombination von Relativgeschwindigkeit und Abstand basiert.

2.2.3.5 Fazit

Die in der Literatur ausgewiesenen stationären Verkehrsbeobachtungen zum Abstandsverhalten von Fahrern liefern zum Teil widersprüchliche Ergebnisse hinsichtlich der Abstandwahl in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. So finden sich Untersuchungen, die sinkende Anteile an Zeitlücken unterhalb 2s bei höheren Geschwindigkeiten aufzeigen (Pfundt, Sumner). In realen Fahrversuchen mit On-Board-Messungen des Abstandes (vgl. Becker [6], Steck [134], Hayafune [62]), die durchweg neueren Datums sind, wird ein linearer bis leicht degressiver Anstieg des Abstandes mit der Geschwindigkeit beschrieben, wobei der Anstieg eine asymptotische Sättigung bei hohen Geschwindigkeiten zeigt und dort zur deutlichen Reduktion der Zeitlücken führt. Bei mittleren Geschwindigkeiten auf städtischen Ringstraßen wählen Fahrer gemäß Fastenmeier [42] nahezu konstante Zeitlücken, die lediglich im Niedriggeschwindigkeitsbereich ansteigen.

Grundsätzlich steigen die gemessenen Abstände mit zunehmender Nässe an, wobei Knepper [77] angibt, dass Fahrer bei extremem Regen den Abstand nicht weiter vergrößern als bei reiner Fahrbahnnässe. Die ermittelten Zeitlücken bleiben dabei jedoch an-

nähernd konstant, da ebenfalls eine Geschwindigkeitsreduktion einhergeht. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Untersuchungen zum Einfluss von Witterungsbedingungen auf stationären Verkehrsbeobachtungen beruhen. Lediglich Steck [134] führte seine Versuche im realen Straßenverkehr durch und findet im Vergleich zu den Beobachtungsversuchen mit zunehmender Nässe auch größere Zeitlücken. Bei Nebel reduzieren Fahrer sowohl Abstand als auch Zeitlücke, was die Autoren darauf zurückführen, dass die Fahrer Sicht zum Vordermann suchen.

Die im Fahrsimulator gemessenen Abstände liegen im Vergleich zu Realfahrten deutlich höher. Dies wird auf Defizite bei der Informationsdarbietung und auf die Eigenschaft von Fahrern, den Abstand im Simulator grundsätzlich zu unterschätzen, zurückgeführt.

3 Zielsetzung und Hypothesenbildung

3.1 Forschungsbedarf

Die in jüngster Vergangenheit in Serienfahrzeugen eingeführten Fahrerassistenzsysteme ACC (vgl. Winner [146]) sowie auf dem japanischen Markt LKS (Lane Keeping Support) (Honda [69]), entlasten den Fahrer nun auch auf der Bahnführungsebene (vgl. Donges [30]). Beim Fahrer finden dort sehr komplexe, kognitive Prozesse statt, die die Aufnahme und Verarbeitung umfangreicher Informationen aus der Umgebung voraussetzen (Bielaczek [10]). Nur nach richtiger Erkennung der Informationen ist der Fahrer in der Lage, unter Berücksichtigung von Gedächtnisinhalten und vorgegebenen Zielen die richtigen Entscheidungen zu treffen und die Fahrzeugstellelemente motorisch zu bedienen (Bubb [18]). Obgleich diese komplexen Prozesse im technischen Assistenzsystem durch Regelkreise und Algorithmen umgesetzt werden müssen, bedarf es auch hier einer hinreichenden Menge an Informationen über die vorliegende Situation. Moderne Fahrerassistenzsysteme benötigen deshalb bereits zur Darstellung ihrer Grundfunktion aufwendige Sensorik. Bereits heute finden sich in modernen Fahrzeugen Radarsensoren und Videokameras mit nachgeschalteter Bildverarbeitung. Um die hohen Entwicklungskosten zügig amortisieren und die Produktionskosten durch höhere Stückzahlen reduzieren zu können, werden sie von den Herstellern möglichst früh auch in niedrigeren Fahrzeugklassen einer breiteren Käuferschicht zugänglich gemacht. Durch den dort höheren Kostenanteil der Systeme an den Gesamtfahrzeugkosten müssen Kaufanreize

durch kostengünstig umsetzbare Funktionserweiterungen geschaffen werden. In der Historie finden sich Beispiele, wie verschiedene, vom Fahrer wählbare Dynamikprogramme (Economy - Sport) von Getriebeautomaten oder die Fernsteuerbarkeit von Zentralverriegelungen. Für das heutige ACC können Funktionserweiterungen in Betracht kommen, die ebenfalls von manuell einstellbaren Dynamikprogrammen bis hin zu situations- und witterungsadaptiven Systemausprägungen reichen. Grundlage für die Umsetzung der letztgenannten Funktionserweiterungen ist die Kenntnis des längsdynamischen Fahrerverhaltens, das nach Willumeit [143] noch unzureichend erforscht ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es das Ziel, die Abhängigkeiten des längsdynamischen Fahrerverhaltens von situativen Größen und den Witterungsbedingungen anhand des Verhaltens eines Referenzkollektivs im Feldversuch (Breuer, J. [16]) so zu beschreiben, dass die Erkenntnisse unter Nutzung der künftig im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Sensordaten in Algorithmen zur Funktionserweiterung eines ACC-Systems umgesetzt werden können.

3.2 Einordnung

Das Folgeverhalten von PKW-Führern wird charakterisiert durch die Wahl der Geschwindigkeit, die Höhe der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen sowie die Wahl des Abstandes zum voraus fahrenden Fahrzeug in Folgefahrt (Hoefs [66]). Diese Größen, die auch als längsdynamische Parameter bezeichnet werden können, werden unmittelbar oder mittelbar über die Betätigung von Fahrpedal und Bremspedal geregelt.

Das Längsführungsverhalten hängt von einer Vielzahl von Einflüssen ab, die sich klassifizieren lassen nach:

- äußeren Fahrtbedingungen,
- technischen Randbedingungen,
- persönlichen Voraussetzungen des Fahrers,
- Intention des Fahrers sowie
- Störungen.

„Äußere Fahrtbedingungen“ legen die äußeren Bedingungen fest und wirken auf die Möglichkeiten des Fahrers ein. Sie können für längere Zeitanteile oder die gesamte Fahrt konstant sein. Hierzu zählen beispielsweise die Witterung, die Tageszeit, die Straßenklasse oder die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern. „Technische Randbe-

dingungen“ hingegen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die Grenzen festlegen, innerhalb derer der Fahrer längsdynamische Parameter wählen kann. Beispiele sind hier der Reibwert, das Leistungsgewicht oder der Zustand des Fahrzeuges. Die „persönlichen Voraussetzungen des Fahrers“, wie z.B. Fahrerfahrung, fahrerisches Können, gesundheitlicher Zustand und persönliche Verhaltensmuster, schränken den möglichen Wertebereich längsdynamischer Parameter innerhalb der technischen Grenzen weiter ein und sind interindividuell verschieden. Zur „Intention des Fahrers“ zählen alle Faktoren, die intraindividuell zwischen einzelnen Fahrten, aber auch innerhalb einer Fahrt starken Schwankungen unterliegen können. Dazu sind beispielhaft zu nennen die Stimmungslage des Fahrers oder das Motiv für die Fahrt. Die beiden letzt genannten Kategorien lassen sich unter dem Begriff „Fahreinfluss“ zusammenfassen. „Störungen“, die im Sinne von nicht vorhersehbaren Singularitäten unsystematisch auftreten, beeinflussen den Fahrtablauf schließlich als zeitlich befristete Einzelereignisse. So mag das plötzliche Fehlverhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers den Fahrer veranlassen, in besonderer Weise zu reagieren, aber auch ein schöner Ausblick abseits des Verkehrsraumes während einer Urlaubsfahrt mag den Fahrer bewegen, Dynamik aus der Fahrt zu nehmen, um einen Teil seiner Aufmerksamkeit der Betrachtung der Umwelt zu widmen.

3.3 Zielsetzung und Grenzen

Ziel der Arbeit ist die Identifikation und Quantifizierung der Einflüsse auf das Längsführungsverhalten und deren wechselseitigen Abhängigkeiten unter Berücksichtigung von Nässe und damit einhergehender Sichtbehinderung. Entsprechend obiger Einflussklassifizierung wird hier ein Teilumfang der Einflüsse aus dem Bereich „äußere Fahrtbedingungen“ analysiert. Insbesondere die Einflüsse, die sich den fahrerbezogenen Kategorien zuordnen lassen, bedürfen der psychologischen, ergonomischen und arbeitswissenschaftlichen Untersuchung und werden hier nicht explizit betrachtet.

3.4 Hypothesenbildung

3.4.1 Top-Down-Ansatz

Bei der Analyse des längsdynamischen Fahrerverhaltens auf Basis äußerer Fahrtbedingungen führt ein Top-Down-Ansatz zu der Frage, welche variablen Parameter die zu untersuchende Situation „eingeschwungene Folgefahrt“ bietet (**Bild 3.1**). Variieren kön-

nen der Ort, das Vorausfahrzeug, Witterungsverhältnisse sowie fahrerbezogene Parameter. Unter Berücksichtigung der so zu beschreibenden Folgefahrtsituationen regelt der Fahrer die längsdynamischen Parameter.

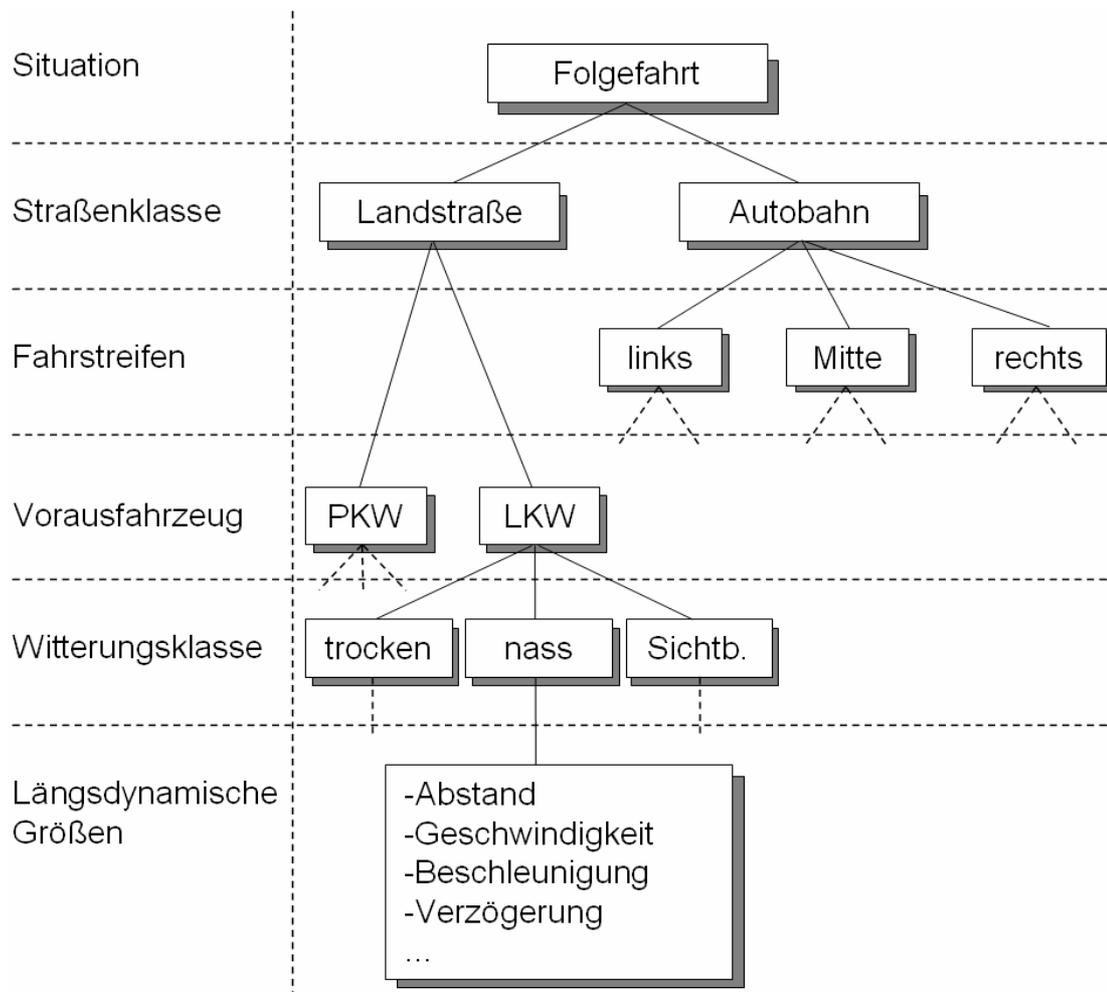


Bild 3.1.: Top-Down-Ansatz der variierenden Situationsparameter

Als mögliche Orte kommen die Straßenklassen Landstraße und Bundesautobahn und bei letztgenannter die verschiedenen Fahrstreifen in Betracht. Ortsdurchfahrten wurden aufgrund der geringen ACC-Anpassungsrelevanz an Witterungsbedingungen nicht berücksichtigt. Als Vorausfahrzeuge werden die Fahrzeugklassen Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge unterschieden. Weitere potenzielle „Führungsfahrzeuge“ wie Fahrräder oder Motorräder werden aufgrund des im Vergleich zu Zweispurfahrzeugen seltenen Auftretens nicht berücksichtigt. Die Witterungsbedingungen werden in Witterungsklas-

sen (s. Kapitel 4.2.2) eingeteilt. Eine Variation der Lichtverhältnisse wurde bei den Versuchen nicht durchgeführt. Die Beschreibung der Dynamik der Fahrt erfolgt durch Berücksichtigung der in der Fahrthistorie aufgetretenen Beschleunigungen und Verzögerungen sowie der Ausnutzung des vorgeschriebenen Tempolimits, wobei die jeweils zugrunde liegende Fahrerintention nicht berücksichtigt wird. Die entsprechenden Verfahren werden in den folgenden Kapiteln definiert.

Damit lässt sich die vorliegende Untersuchung in drei Hauptbereiche einteilen:

- Analyse der Grundgrößen des Folgefahrtverhaltens (Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke) bei der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern und deren Abhängigkeiten vom Ort und der Art des Vorausfahrzeuges.
- Analyse des Einflusses der Dynamik der Fahrt (maximale Beschleunigungen, maximale Verzögerung und Tempolimitnutzung) und deren wechselseitige Abhängigkeiten.
- Analyse des Einflusses der Witterung auf das Folgeverhalten von Fahrzeugführern.

3.4.2 Ableitung der Hypothesen

Zu den Hauptbereichen der Untersuchung werden an dieser Stelle die Hypothesen aufgestellt. Sie stellen gemäß späterer Definition (s. Kapitel 4.2.2) Nullhypothesen dar, die es im Verlauf der Untersuchung durch statistische Methoden zu widerlegen gilt.

3.4.2.1 Abhängigkeiten der Grundgrößen

Es wird zunächst vermutet, dass die Grundgrößen des Folgefahrtverhaltens, das heißt der Abstand zum voraus Fahren, die Zeitlücke und die gefahrene Geschwindigkeit in eingeschwungenen Folgefahrtsituationen gegenseitigen Abhängigkeiten unterliegen. Becker [6], Dreyer [34] und Hoefs [66] geben an, dass Fahrer mit zunehmender Geschwindigkeit den Folgeabstand erhöhen. Dies kann zu einer Konstanz der Zeitlücke führen, was im Weiteren nachzuweisen ist. Es wird zunächst vermutet, dass Fahrer ihr Folgeverhalten auch von der Art des Vorausfahrzeuges und der Straßenklasse sowie vom befahrenen Fahrstreifen abhängig machen.

Als Nullhypothesen werden formuliert:

- Der stationäre Folgeabstand wird unabhängig von der Geschwindigkeit gewählt.
- Die stationäre Folgezeitlücke wird unabhängig von der Geschwindigkeit gewählt.

- Die Straßenklasse (Landstraße/BAB) hat keinen Einfluss auf das Folgeverhalten.
- Das Folgeverhalten (Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke) ist unabhängig vom befahrenen Fahrstreifen auf Bundesautobahnen.
- Die Art des Vorausfahrzeuges (PKW/LKW) hat keinen Einfluss auf das Folgeverhalten (Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke).

3.4.2.2 Dynamik der Fahrt

Die Dynamik der Fahrt in der Fahrthistorie könnte Einfluss auf das anschließende Folgefahrverhalten haben. Es wird davon ausgegangen, dass Fahrer, die in der unmittelbaren Historie sehr dynamisch, das heißt mit hohen maximalen Verzögerungen bzw. Beschleunigungen und unter hoher Ausnutzung des vorgeschriebenen Tempolimits gefahren sind, in einer sich anschließenden Folgefahrt einen kleineren Abstand und eine kleinere Zeitlücke wählen als nach weniger dynamischem Fahrtverlauf. Darüber hinaus werden wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Beschleunigung und Verzögerung vermutet. Auch eine ausgeprägte eigene Überholtätigkeit sowie das Vorbeischauen zum Überholen bei Folgefahrt könnte Einfluss auf das Folgeverhalten ausüben.

Als Nullhypothesen werden formuliert:

- Die Abstandswahl ist unabhängig von der Höhe der in der Fahrthistorie aufgetretenen maximalen Verzögerungen.
- Die Abstandswahl ist unabhängig von der Höhe der in der Fahrthistorie aufgetretenen maximalen Beschleunigungen.
- Die dynamischen Größen maximale Beschleunigung und maximale Verzögerung sind unabhängig.
- Die Abstandswahl ist unabhängig von der Häufigkeit des Überholens (Landstraße/BAB).
- Die Abstandswahl ist unabhängig davon, ob am Führungsfahrzeug zur Vorbereitung eines Überholmanövers vorbei geschaut wird.
- Die Abstandswahl ist unabhängig von der Tempolimitausnutzung in der Fahrthistorie.

3.4.2.3 Einfluss der Witterung

Die vorliegenden Witterungsverhältnisse in einer Folgefahrtsituation haben Einfluss auf das Folgeverhalten. Trotz zum Teil widersprüchlicher Angaben in der Literatur (Hier-

sche [64], Hoffmann [67], Knepper [77] und Steck [134]) ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Witterungsbedingungen mit einer Veränderung des Abstandes und der Zeitlücke einhergehen und dies zu einer Veränderung der Fahrgeschwindigkeit sowie der Dynamik, bezüglich maximaler Beschleunigungen und Verzögerungen, führt.

Als Nullhypothesen werden formuliert:

- Der Folgeabstand ist unabhängig von den drei Zuständen Trockenheit, Nässe und Sichtbehinderung.
- Die Wahl der Geschwindigkeit ist unabhängig von den drei Zuständen Trockenheit, Nässe und Sichtbehinderung.
- Die Höhe der maximalen Verzögerungen ist unabhängig von den drei Zuständen Trockenheit, Nässe und Sichtbehinderung.
- Die Höhe der maximalen Beschleunigungen ist unabhängig von den drei Zuständen Trockenheit, Nässe und Sichtbehinderung.

4 Methodik

4.1 Versuchskonzept

Die in der Literatur gefundenen Widersprüche hinsichtlich des Folgeverhaltens zwischen stationärer Verkehrsbeobachtung, Simulatorversuch und realer Versuchsfahrt deuten auf unterschiedliche Validität der gewählten Untersuchungsansätze hin, d.h. dass bei den verschiedenen Untersuchungen, Reliabilität und Objektivität vorausgesetzt, offensichtlich die analysierten Merkmale in unterschiedlich hohen Graden erfasst wurden.

Wie bereits beschrieben, ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, das Folgefahrtverhalten eines Referenzkollektivs zu bestimmen, welches sich zur Anpassung einer Adaptive Cruise Control an situative Merkmale und Witterungsbedingungen eignet. Dabei steht eine valide Erfassung der Abhängigkeiten des Folgefahrtverhaltens von diesen Einflüssen im realen Straßenverkehr im Mittelpunkt, wofür sich ein Feldversuch unter realen Bedingungen besonders eignet (Breuer, J. [16]). Obgleich die Art und Anzahl der auftretenden Situationen im Feldversuch nur bedingt kontrollierbar sind, lassen sich durch

statistische Verfahren bei Vorliegen eines hinreichend großen Stichprobenumfangs valide Aussagen für die zu analysierenden Einflüsse sicherstellen.

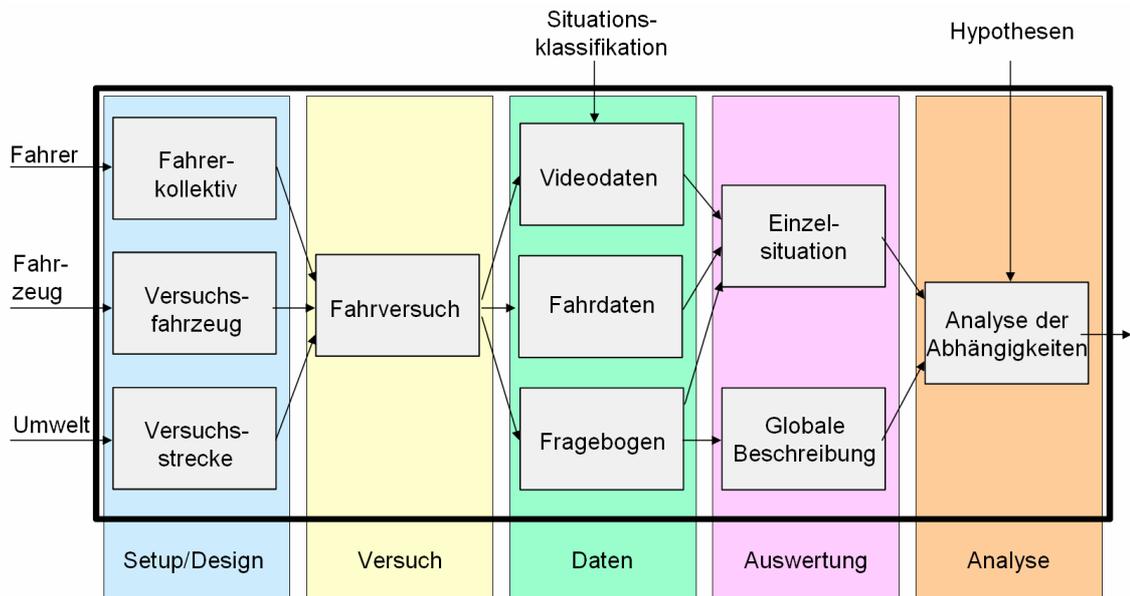


Bild 4.1.: Versuchsmethodik

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Feldversuch mit 24 Versuchspersonen in einem mit Messtechnik ausgestatteten Versuchsfahrzeug auf einem Rundkurs um Darmstadt durchgeführt. Dabei wurden fahrdynamische Daten messtechnisch, persönliche Daten mittels Fragebögen und die Fahrtraumscene durch eine Videokamera erfasst (**Bild 4.1.**). Der während der Fahrten im Fahrzeug mitfahrende Versuchsleiter protokollierte darüber hinaus die Witterungsbedingungen sowie Besonderheiten und Störungen im Sinne der Einflussklassifizierung.

Die Reproduzierbarkeit der Versuche wurde dadurch sichergestellt, dass sie in immer der gleichen Weise hinsichtlich des Versuchsaufbaus und stets zu gleichen Tageszeiten, nämlich vormittags ab 09:00 Uhr an Werktagen durchgeführt wurden. Dies führte dazu, dass die Lichtverhältnisse zwischen den Versuchen nicht variierten. Die Verkehrsdichten wurden nicht aufgezeichnet. Darüber hinaus erhielten alle Fahrer die gleiche Einweisung in das Versuchsfahrzeug. Die Navigation über die den Fahrern unbekannte Versuchsstrecke übernahm der Versuchsleiter durch Fahrtrichtungsansagen.

Die Objektivität der Daten wurde durch die messtechnische Erfassung der fahrdynamischen Größen (vgl. **Tabelle 4.2.**) sowie durch objektiv scharf abgrenzbare Witterungsklassen (siehe Kapitel 4.2.2) sichergestellt. Subjektive Beschreibungen der Eindrücke

des Versuchsleiters waren nicht notwendig. In der Videoauswertung wurden ebenso scharf abgrenzbare, objektive Kriterien zur Beschreibung situativer Merkmale definiert.

Die Einschränkungen hinsichtlich der Gültigkeit, die sich durch die Festlegung des Systems Fahrer-Fahrzeug-Umgebung für den Versuch ergeben, werden im Kapitel 6 „Diskussion“ erörtert.

4.1.1 Fahrer

Für die Anwerbung von Versuchspersonen wurde im Rahmen des S.A.N.T.O.S-Projekts in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Arbeitswissenschaft (IAD) der TU Darmstadt ein Probandenpool zusammengestellt. Bei der Auswahl des Probandenkollektivs wurde versucht, die fünf Altersklassen (vgl. **Bild 4.2.**) gleichmäßig zu besetzen. Schwierig gestaltete sich dabei die Suche sowohl nach älteren als auch nach weiblichen Probanden. Somit finden sich eine Häufung in der Klasse der 36- bis 45-jährigen und eine Unterbesetzung der Klasse der über 55-jährigen. Darüber hinaus sind weibliche Fahrer unterrepräsentiert.

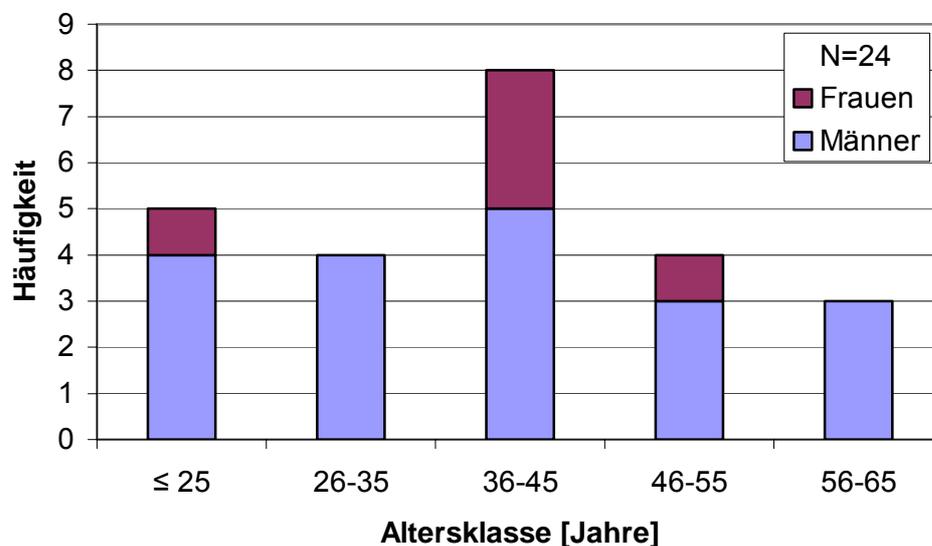


Bild 4.2.: Häufigkeitsverteilung des Alters der Probanden

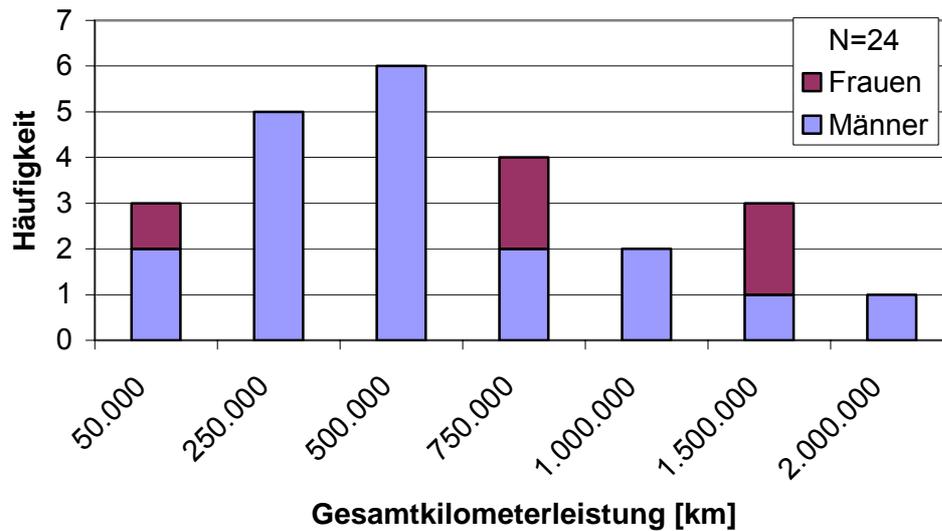


Bild 4.3.: Häufigkeitsverteilung der Gesamtkilometerleistung der Probanden

Bild 4.3. zeigt die von den 19 männlichen und 5 weiblichen Versuchspersonen in den Fragebögen angegebenen Gesamtkilometerleistungen.

4.1.2 Fahrzeug

Als Versuchsfahrzeug kam ein leistungsstarkes Modell der Oberklasse (BMW 740i, E38) mit 5-Gang-Automatikgetriebe zum Einsatz (**Bild 4.4.**). Eine Auswahl der technischen Daten sind **Tabelle 4.1.** zu entnehmen.

Zur Aufzeichnung der fahrdynamischen Daten war im Kofferraum des Fahrzeuges ein PC-System installiert (**Bild 4.5.**), das die Daten vom Serien-CAN-Bus des Fahrzeuges bezog und

mit einer Abtastrate von 10Hz aufzeichnete. Das im Fahrzeug eingesetzte ACC, das dem ab dem Jahr 2000 ausgelieferten Serienstand entsprach, wurde während der Versuchsphase als Abstandsmessensorik eingesetzt.

Tabelle 4.1.: Technische Daten BMW 740i (E38)

Technische Daten	
Fahrzeugtyp	BMW 740i (E38)
Nennleistung	210kW
Hubraum	4398 cm ³
Leergewicht	2090 kg
Getriebe	5-Gang-Automatik
Abmessungen	4985 x 1860 x 1440 mm
Baujahr	1999

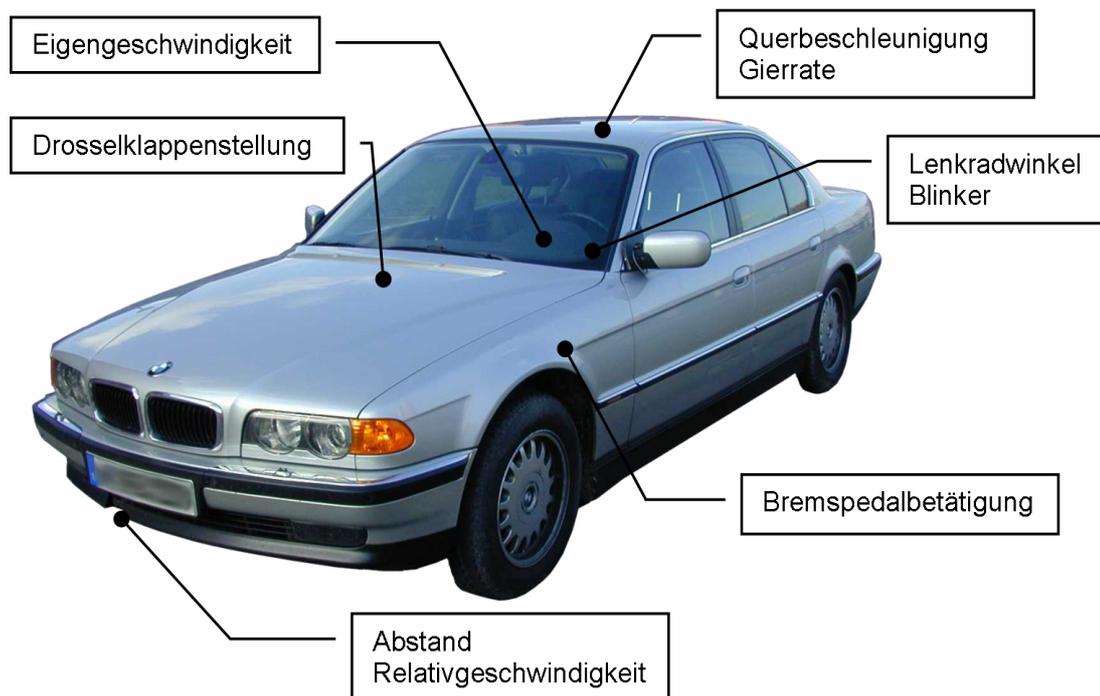


Bild 4.4.: Versuchsfahrzeug BMW 740i (E38) und messtechnisch erfasste Größen

Zur Aufzeichnung der Fahrtraumszene war im Bereich des Innenspiegels eine in den Dachhimmel integrierte Kamera montiert. Der zugehörige S-VHS-Videorekorder befand sich im Kofferraum des Fahrzeuges.

Somit verblieb der Innenraum optisch in nahezu serienmäßigem Zustand, und der Fahrer konnte die vorhandene Messtechnik nicht wahrnehmen.



Bild 4.5.: Messtechnik im Kofferraum des Versuchsfahrzeuges

Im Einzelnen wurden die in **Tabelle 4.2.** aufgeführten Größen gemessen.

Tabelle 4.2.: Messgrößen

<i>Messgröße</i>	<i>Einheit</i>
Querschleunigung	m/s ²
Gierrate	rad/s
Eigengeschwindigkeit	km/h
Lenkradwinkel	°/s
Blinkerbetätigung	1
Bremspedalbetätigung	1
Drosselklappenstellung	%
Abstand	m
Relativgeschwindigkeit	km/h

4.1.3 Umgebung

Für die Wahl der Versuchsstrecke wurden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Abdeckung der Straßenklassen Landstraße und BAB,
- Versuchsdauer: um die zeitliche Belastung der Versuchspersonen zu beschränken (so kurz wie möglich) und dennoch eine möglichst hohe Anzahl an Situationen zu erhalten (so lange wie möglich) wird eine Gesamtdauer von 2-3 Stunden Fahrt angestrebt,
- große Anzahl an Situationsvarianten bei möglichst hoher Situationsdichte
 - Landstraße: variierende Kurvigkeit, Überholmöglichkeiten,
 - Autobahn: starke und weniger stark befahrene Anteile, wenig Tempolimits, z.T. Hochgeschwindigkeitsanteile,
- möglichst gute Fahrbahnmarkierungen, um objektive Videoauswertung zu ermöglichen,
- Meidung von Ortsdurchfahrten, da diese bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden,
- Rundkurs mit Nähe zur TU Darmstadt, zur Vermeidung einer zusätzlichen Anfahrt.

Die gewählte Strecke (Abbildung siehe Anhang **Bild 8.1.**, S. 93) kann wie folgt charakterisiert werden:

Tabelle 4.3.: Eigenschaften der Versuchsstrecke

Nr.	Bez.	nach	Distanz	Klasse	Nutzung
		TU Darmstadt			
1.	B26	Dieburg	14,9 km	Land	Einfahren
2.	B45	Michelstadt	31,0 km	Land	Messung
3.	B47	Weilbach	20,1 km	Land	Messung
4.	B469	A3, AS Stockstadt	44,3 km	BAB 2-str.	Messung
5.	A3	Mönchhofdreieck	44,0 km	BAB 3-str.	Messung
6.	A67	Gernsheim	37,8 km	BAB 2-str.	Messung
7.	A67	Darmstädter Kreuz	15,7 km	BAB 2-str.	Messung
8.	Stadt	TU Darmstadt	7,7 km	Stadt	Rückfahrt
gesamt:			215,5 km		

4.1.4 Versuchsdurchführung

Die insgesamt 24 Versuchsfahrten wurden in den Monaten Mai bis Juli durchgeführt. Aufgrund des Hauptaugenmerks auf die Variation von Witterungsbedingungen wurden die einzelnen Fahrten jeweils nur dann angetreten, wenn es bereits regnete oder mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden durfte, dass im Verlauf der Fahrt die Witterung variieren würde.

Als Fahrauftrag erhielten die Versuchspersonen stets: „Fahren Sie so, wie sie dies mit ihrem eigenen Fahrzeug tun würden.“

4.2 Definitionen und abgeleitete Größen

4.2.1 Fahrdynamische Kennwerte

Um die Abhängigkeiten des Folgefahrtverhaltens von der Dynamik der Fahrt beschreiben zu können, ist zunächst zu klären, was hier unter dem Begriff „Dynamik“ verstanden wird.

Gemeint ist, wie „rasant“, „sportlich“ oder „aggressiv“ die Fahrweise des Fahrers bezeichnet werden kann. Da dies jedoch Attribute zur subjektiven Beurteilung des „Fahrstils“ sind, die Beschreibung von Abhängigkeiten allerdings objektiven Kriterien genü-

gen und das Ergebnis unabhängig von der versuchsdurchführenden Person sein soll, muss die Erfassung der „Dynamik“ auf objektiv messbaren Größen basieren. In der Literatur findet sich die Definition „Die Dynamik (auch Kinetik genannt) ist ein Teilgebiet der Mechanik und beschreibt im Gegensatz zur Statik und Kinematik die Änderung der Bewegungsgrößen (Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung) unter Einwirkung von Kräften im Raum.“ [142]. Angewandt auf Folgefahrten lassen sich damit zur Beschreibung zunächst die folgenden Größen angeben:

- Geschwindigkeit
- Beschleunigung
- Verzögerung

Im weiteren Verlauf wird jedoch deutlich, dass sich aufgrund der Unterschiedlichkeit der verschiedenen Situationen, die obigen Größen nicht in definitionsgemäßer Form als reine „Änderung der Bewegungsgrößen“ [142] anwenden lassen, sondern auf die Besonderheiten des realen Verkehrsgeschehens in Form von alternativer Kennwerte eingegangen werden muss.

4.2.1.1 Tempolimitnutzung

Da in der vorliegenden Arbeit das Abstandsverhalten nach dem Annäherungsvorgang im eingeschwungenen Teil von Folgefahrten zu beschreiben ist, eignet sich die in der Folgefahrt gefahrene Geschwindigkeit nicht als Bezugsgröße. Sie wird dann im Wesentlichen vom voraus fahrenden Fahrzeug vorgegeben. Zwar ist auch dies Gegenstand der späteren Untersuchung, unter dem Aspekt „Dynamik der Fahrt“ ist jedoch zu analysieren, wie der Fahrer unter den gegebenen, objektiv erfassbaren und durch äußere Einflüsse (vgl. Kapitel 3.2) eingeschränkten Bedingungen seine Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Eintritt in die Folgefahrt gewählt hat, als er noch als unbeeinflusst durch das voraus fahrende Fahrzeug angesehen werden konnte.

Zur Beurteilung, wie dynamisch ein Fahrer gefahren ist, gilt es ein Kriterium zu finden, das die Referenz einer „normalen“ bzw. „angepassten“ Geschwindigkeit widerspiegelt. Ein objektives und reliables Kriterium hierfür stellt das jeweils geltende Tempolimit dar, welches von den Straßenverkehrsbehörden unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten ausgesprochen wird. Die Aufzeichnung dessen ist darüber hinaus durch die Videoauswertung mit geringem Aufwand zu bewerkstelligen.

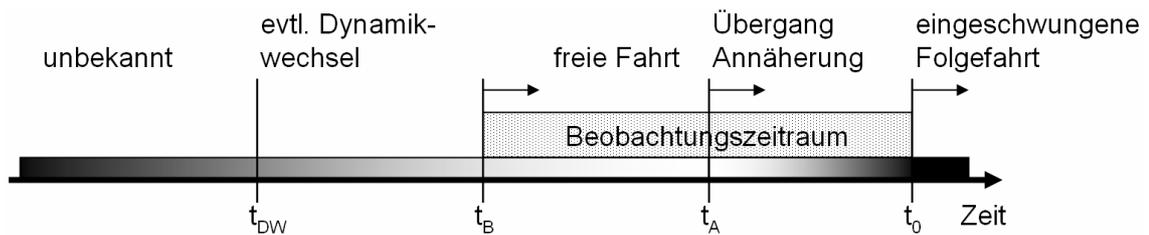


Bild 4.6.: Zeitachse vor Folgefahrt

Darüber hinaus ist festzulegen, welcher Zeitraum vor der Folgefahrtsituation beachtet werden muss (Beobachtungszeitraum), um eine valide Aussage über das dynamische Verhalten des Fahrers anhand der Geschwindigkeit zu erhalten (siehe **Bild 4.6.**). Unmittelbar vor dem Eintritt in die Folgefahrtsituation findet eine Übergangssituation, meist eine Annäherung, statt. Vor diesem Übergang (t_A) befand sich der Proband meist in freier Fahrt. Je weiter in die Historie geblickt wird, umso unbekannter ist die vorliegende Situation. Zudem könnte der Fahrer seinen Fahrstil zwischenzeitlich geändert haben. Die Literatur gibt allerdings keine Antwort auf die Frage, in welchen Zeitspannen ($t_{DW} - t_{DW-1}$) Fahrer üblicherweise die Fahrdynamik ändern. Es ist zu beachten, dass im Verlauf der 24 Versuchsfahrten durchschnittlich alle 73,3s das Tempolimit wechselte (Standardabweichung 5,5s). Wird unterstellt, dass damit für den Fahrer stets eine neue Situation vorliegt, auf die er mit unterschiedlicher Strategie für die Geschwindigkeitswahl reagieren kann, so ist die Länge des Beobachtungszeitraumes kürzer als dieser Wert zu wählen, um im Mittel nicht verschiedene Situationen gleichzeitig zu berücksichtigen. Der Beobachtungszeitraum ist damit einerseits so groß zu wählen, dass nicht nur die Übergangsphase in die Bewertung einbezogen wird und andererseits so klein, dass der Fahrer möglichst keinen Situations- und Fahrdynamikwechsel vorgenommen hat. Als Beobachtungszeitraum werden die letzten 60s festgelegt.

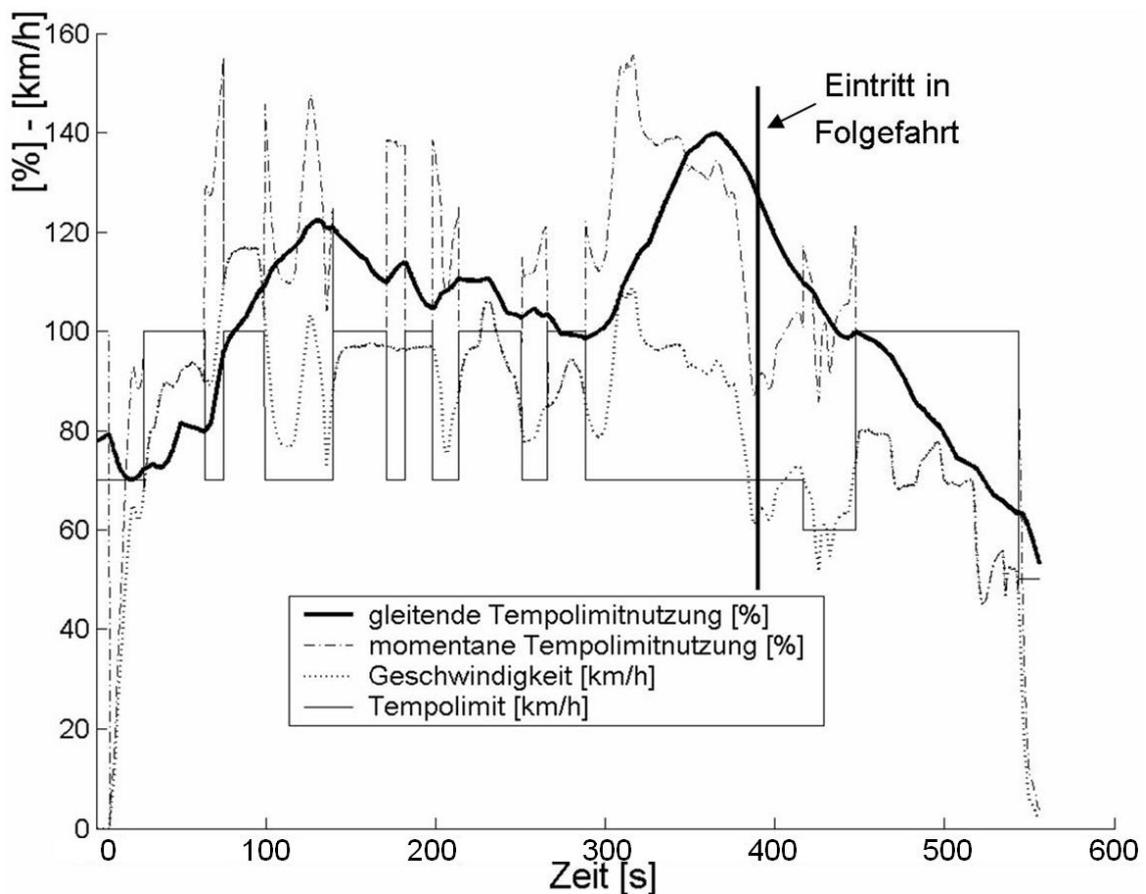


Bild 4.7.: Kennwert Tempolimitnutzung

Das Verfahren zur Ermittlung des Kennwertes „Tempolimitnutzung“ wird anhand des nachfolgenden Beispiels gezeigt. **Bild 4.7.** zeigt einen etwa 10-minütigen Ausschnitt einer Landstraßenfahrt. Dargestellt ist das zwischen 50 und 100km/h variierende Tempolimit mit der zugehörigen, punktiert eingetragenen momentanen Geschwindigkeit. Aus diesen Größen wird zunächst die strichpunktiert dargestellte prozentuale Ausnutzung des Limits (momentane Tempolimitnutzung – vgl. (Gl. 4.1.)) berechnet und der Kennwert Tempolimitnutzung aus einer gleitenden Mittelwertbildung über die letzten 60s der Fahrt gebildet.

$$\text{momentane Tempolimitnutzung} = \frac{v_{\text{ist}}}{v_{\text{Limit}}} \quad (\text{Gl. 4.1.})$$

Die durch die Mittelwertbildung eintretende zeitliche Verzögerung wird bewusst hingenommen, obgleich dies in der Offline-Auswertung korrigiert werden könnte. Der Grund ist, dass bei späterer Übertragung der Ergebnisse in das Fahrzeug eine Echtzeitberechnung ebenfalls zu einer zeitlichen Verzögerung führen wird.

Für die bei etwa 390 Sekunden beginnende Folgefahrt in **Bild 4.7.** wird eine Tempolimitnutzung von ca. 130% gefunden, die aussagt, dass der Fahrer kurz vor der Folgefahrt deutlich „dynamischer“ gefahren ist, als es anhand des Referenzkriteriums (geltendes Tempolimit = 100%) als „normal“ anzusehen wäre. Die spätere Auswertung erfolgt in den Tempolimitnutzungsklassen bis 50, 50-80, 80-110, 110-140 und über 140%.

4.2.1.2 Maximalbeschleunigungen/-verzögerungen

Ein weiteres Kriterium zur Beschreibung der Dynamik der Fahrt ist das Beschleunigungsverhalten des Fahrers. Es kann unterhalb der Kraftschlussgrenze frei vom Fahrer gewählt werden. Selbst niedrige Geschwindigkeitsänderungswünsche können mit hohen Beschleunigungen umgesetzt werden. Begrenzt wird das Beschleunigungsvermögen allerdings durch die auf die Masse bezogene Leistung des Fahrzeuges sowie durch die Fahrwiderstände. Durch den quadratischen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Zuwachs an kinetischer Energie fällt das Beschleunigungsvermögen mit zunehmender Geschwindigkeit hyperbelartig ab.

Um eine Aussage über die Dynamik der Fahrt zu erhalten, wird eine Kenngröße gesucht, die beschreibt, wie stark der Fahrer beschleunigt oder verzögert. Er hat die Wahl, mit hoher Beschleunigung seine Zielgeschwindigkeit schnell oder mit mäßiger Beschleunigung diese erst nach einer längeren Zeitdauer zu erreichen. Der Ansatz einer direkten Mittelwertbildung des Beschleunigungssignals erlaubt deshalb keine Aussage zur seitens des Fahrers gewählten Dynamik, da dieses Verfahren einer Integration der Beschleunigung über der Zeit entspricht. Die hieraus zu gewinnende Information ist gemäß **Gl. 4.2.** lediglich eine Aussage über die absolute, gefahrene Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitsänderung.

$$v = \int a \cdot dt \quad (\text{Gl. 4.2.})$$

Dem zufolge darf eine zeitliche Gewichtung der Beschleunigung nicht erfolgen. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz ist in **Bild 4.8.** dargestellt. Er berücksichtigt ausschließlich die maximalen Beschleunigungen.

Die Kennwertbildungsvorschrift lautet:

1. Glätten des Beschleunigungssignals durch gleitende Mittelwertbildung über 5 Messwerte (0,5s), zur Unterdrückung des Sensorrauschens.
2. Einzelintervalle zwischen Nulldurchgängen des geglätteten Beschleunigungssignals bilden.

3. In Beschleunigungsintervallen das Maximum, in Verzögerungsintervallen das Minimum berechnen.
4. Um Minimalbeschleunigungen, wie sie bereits bei der Regelung einer konstanten Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsänderungen von unter 1km/h pro Sekunde) auftreten, nicht in den Kennwert einzubeziehen, alle Einzelmaxima/-minima innerhalb eines $\pm 0,25\text{m/s}^2$ -Bandes um 0 verwerfen.
5. Getrennte gleitende Mittelwertbildung für Beschleunigungen und Verzögerungen über die letzten 120s.

Hier ist bei der Definition des Beobachtungszeitraumes zu berücksichtigen, dass bei der Mittelwertbildung nur die jeweils einzelnen, maximalen Beschleunigungen in die Berechnung eingehen (siehe Kreise in **Bild 4.8.**). Dies sind nur wenige Extrema pro Minute, weshalb die Zeitkonstante größer als beim Kennwert „Tempolimitnutzung“ (60s) zu wählen ist, um einen sofortigen Abfall des Kennwerts bei Konstantfahrt zu verhindern. Andererseits können sich analog zum vorherigen Kapitel die Situationen und die vom Fahrer gewählte Dynamik ändern, deren Einflüsse sich durch eine kleine Zeitkonstante eliminieren ließen. Wie eingangs beschrieben, hat der Fahrer allerdings die Möglichkeit seine Beschleunigungen freier zu wählen als seine Geschwindigkeit, weshalb eine Festlegung der Zeitkonstanten auf 120s erfolgt.

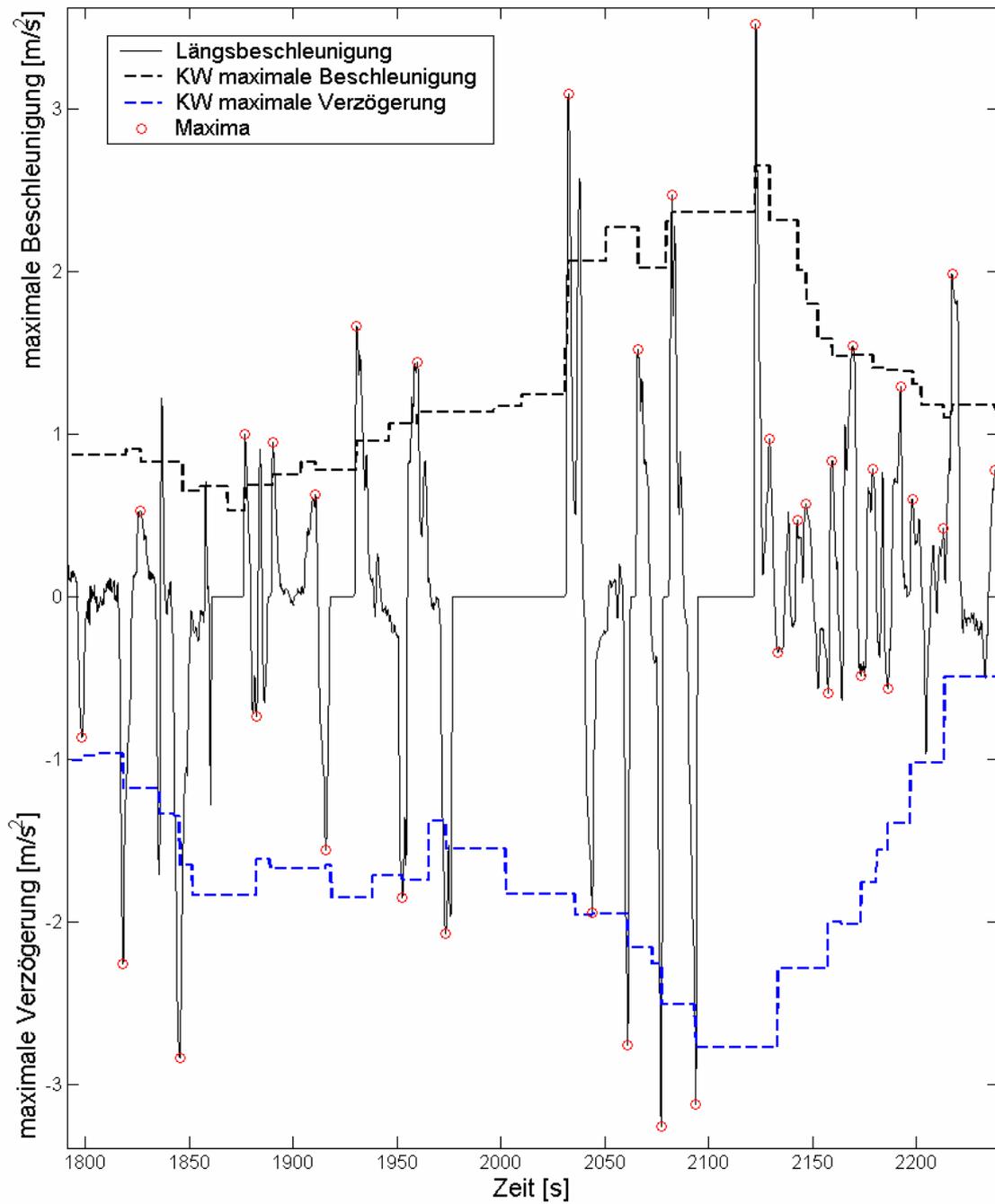


Bild 4.8.: Kennwerte Maximalbeschleunigung / Maximalverzögerung

Auch hier entsteht ein Zeitverzug, der unter oben genannten Gesichtspunkten bewusst akzeptiert wird. Die Abbildung zeigt die jeweils dem Betrag nach mit zunehmender Dynamik steigenden Kennwerte für Beschleunigung und Verzögerung.

4.2.1.3 Anzahl an Überholungen

Eine weitere Aussage über die Art, wie dynamisch der Fahrer fährt, wird in der Anzahl an eigenen Überholvorgängen vermutet. Hierzu wird ein Kennwert definiert, der die Anzahl an Überholvorgängen in den letzten 300 Sekunden aufsummiert. Bei der Festlegung dieser Zeitkonstante wurde berücksichtigt, dass Überholvorgänge für den Fahrer nicht ständig möglich sind. Eingeschränkt wird die Möglichkeit durch Gegenverkehr, Streckencharakteristik, Überholverbote, Sichtweiten und weitere Umstände. Dennoch wurde die Zeitkonstante nicht vergrößert, da, wie bereits bei der Definition der Beschleunigungskennwerte beschrieben, sich das Fahrerverhalten während der Fahrt ändern kann und die Berücksichtigung eines lange zurückliegenden Überholmanövers mit dem aktuellen Verhalten nichts mehr zu tun haben wird.

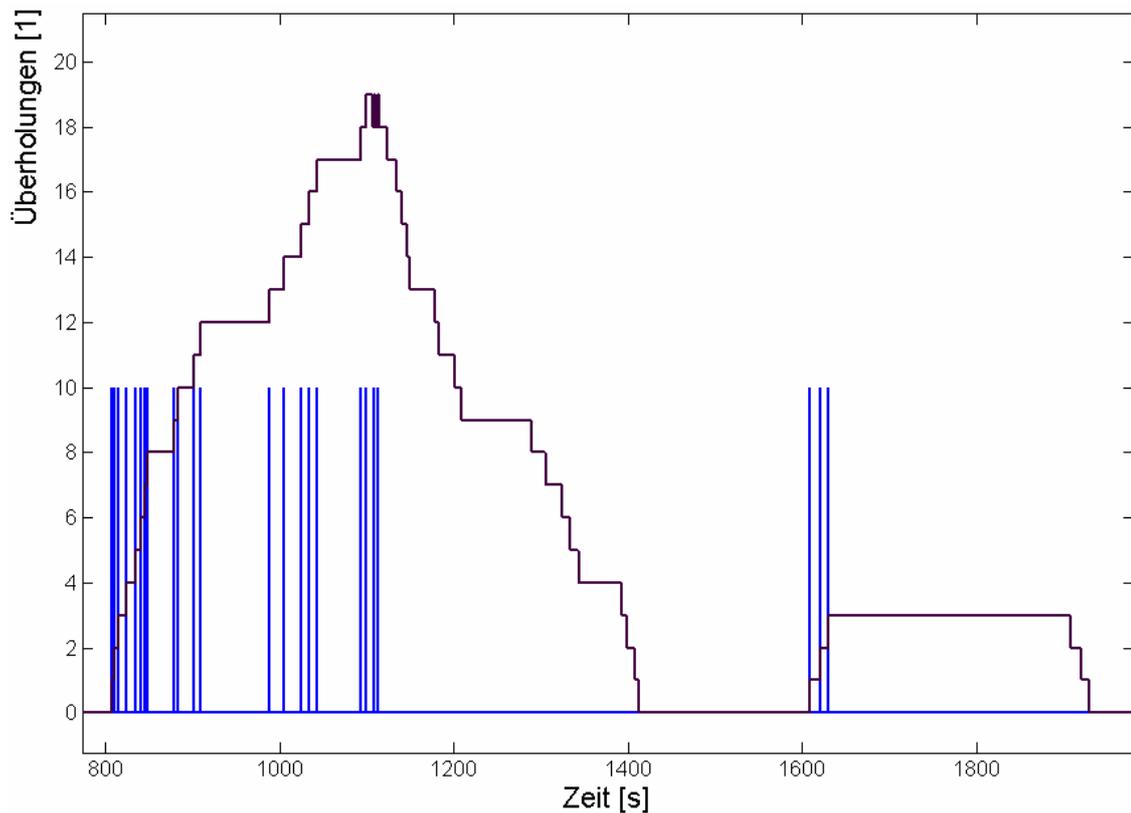


Bild 4.9.: Kennwerte Überholanzahl

In **Bild 4.9.** sind zwei Bereiche von Straßenklassen dargestellt. Die Situation zwischen 800 und 1450 Sekunden entspricht einer Autobahnfahrt, wobei die einzelnen Peaks jeweils einzelne Überholvorgänge repräsentieren. Als durchgezogene Linie ist der Kenn-

wert „Überholanzahl“ aufgetragen, der die Anzahl an Überholungen in den letzten 300 Sekunden aufsummiert.

Im rechten Bereich ab etwa 1600 Sekunden ist eine Bundesstraßenfahrt dargestellt. Unmittelbar auffällig ist, dass auf Bundesautobahnen, aufgrund der häufigen Möglichkeit, auf dem linken Fahrstreifen Fahrzeuge überholen zu können, der Kennwert wesentlich größere Werte annimmt als auf Bundesstraßen, wo diese Möglichkeit nicht gegeben ist. Hieraus wird abgeleitet, dass die spätere Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen dem Folgefahrverhalten und der Anzahl an eigenen Überholvorgängen für beide Straßenklassen getrennt wird.

4.2.2 Witterungsklassifikation

Obgleich es natürlich wünschenswert wäre, die Witterungsbedingungen nach objektiven Kriterien wie z.B. den Dimensionen Fahrbahnzustand, Reibwert, Wassertiefe, Temperatur und Sichtverhältnisse beschreiben zu können (vgl. Hiersche [64]), lässt sich dies aufgrund der in dieser Arbeit fehlenden Sensorik nicht untersuchen. Gesucht wurde eine Einteilung der Witterung in eine überschaubare Anzahl an Klassen, die vom Versuchsleiter reproduzierbar und objektiv klassifiziert werden kann.

Tabelle 4.4: Witterungsklassen (Graufärbung: nicht untersucht)

Dimension	Wert	Beschreibung
Fahrbahnzustand	trockene Fahrbahn	Fahrbahn ist <u>trocken</u> oder <u>nicht vollständig</u> benetzt
	nasse Fahrbahn	Fahrbahn ist <u>vollständig</u> benetzt
	glatte Fahrbahn	Fahrbahn weist in den Fahrspuren Schnee oder Eis auf
Sichtbedingungen	Regen / Sichtbehinderung	starker Regen oder Spritzwasser, so dass der Fahrer den Scheibenwischer <u>permanent</u> eingeschaltet lässt
	keine Sichtbehinderung	alle oben nicht erfassten Sichtzustände

Felke (zit. in [67]) kommt zu dem Schluss, dass Fahrer ihr Verhalten bei schlechter Witterung weniger an die Nässe der Straße anpassen, sondern vielmehr an die Sichtbedingungen. Als zweckmäßige Dimensionen für die Klassifizierung der Witterungsbedingungen ergeben sich somit der Fahrbahnzustand, der insbesondere eine Aussage über die Änderungen bezüglich des Kontaktverhaltens zwischen Reifen und Fahrbahn infolge von Zwischenmedien gibt, und die Sichtbedingungen, unter denen hier Nässe auf der

Frontscheibe des Fahrzeuges verstanden werden soll. **Tabelle 4.4.** gibt Aufschluss über die Unterteilung der Dimensionen und weist die Beschreibungen aus, anhand derer der Versuchsleiter seine Aufzeichnung vornahm.

Selbstverständlich ist, dass die Klasse „Regen/Sichtbehinderung“ in dieser Definition stets nur mit „nasser Fahrbahn“ einhergehen kann und umgekehrt „trockene Fahrbahn“ nur ohne Sichtbehinderung auftritt. Glatte Fahrbahnen wurden jahreszeitbedingt nicht vorgefunden.

Die tatsächlich besetzten Klassen lassen sich damit reduzieren auf:

- „trocken“,
- „nass“ und
- „Sichtbehinderung“.

Die Einteilung wurde vom Versuchsleiter während der Fahrt vorgenommen.

4.2.3 Situationen

4.2.3.1 Folgefahrt

Die automatisierte Ermittlung der Folgefahrtsituationen auf Basis der Messdaten erfolgte anhand nachstehender Parameter:

- Vorausfahrendes Fahrzeug erkannt: ja
- Ego-Geschwindigkeit: > 30km/h
- Fremdgeschwindigkeit: > 30km/h
- Relativgeschwindigkeit: < 15km/h
- Situationsdauer: > 10s

Diese Definition arbeitet mit konservativen Parametern, wodurch nur die eindeutigen Folgefahrten in die Auswertung einbezogen werden. Situationen kürzer als 10s, die gemäß Literatur zwar noch als Folgefahrten bezeichnet werden dürften, meist allerdings im Umfeld dynamischer Übergänge (z.B. Einscheren, Ausscheren) auftreten, werden hierdurch ausgefiltert. Durch die jeweilige Mindestgeschwindigkeit von 30km/h werden darüber hinaus die Einflüsse aus Stop-and-Go-Prozessen aus der Analyse fern gehalten (Fastenmeier [42]).

Ergebnis dieser automatischen Berechnung sind zunächst Intervalle, die als Folgefahrten identifiziert wurden. Für die weitere Verarbeitung werden nur die Bereiche nach dem ersten Nulldurchgang der Relativgeschwindigkeit verwendet, wodurch der Annäherungsvorgang und eventuelles „Eintauchen“ (zunächst dichtes Auffahren mit anschließendem Zurückfallen) eliminiert werden.

Für alle ermittelten Situationen werden die statistischen Daten Mittelwert, Minimum, Maximum, Median und Standardabweichung der Größen Abstand, Zeitlücke, Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung und Witterungsklasse berechnet. Je nach Situation werden die Werte Startzeitpunkt, Endzeitpunkt, Kennwerte (Tempolimitnutzung, maximale Beschleunigung, maximale Verzögerung und Überholanzahl) zu Beginn der Situation, das Bit „Vorbeigeschaut“ (0/1) sowie die Straßenklasse, der Fahrstreifen und das Vorfahrzeug für jede Situation gespeichert.

Bei den längsdynamischen Größen Geschwindigkeit, Abstand, Zeitlücke und Beschleunigung werden in der Ergebnisdarstellung die Mediane dieser Größen aus allen Messwerten, die im Verlauf der entsprechenden Situationen aufgezeichnet wurden, verwendet.

4.2.3.2 Freie Fahrt

Die Berechnung der Abschnitte „Freie Fahrt“ erfolgt unter Berücksichtigung nachfolgender Parameter:

- Vorfahrendes Fahrzeug erkannt: nein
- Ego-Geschwindigkeit: > 30km/h
- Geschwindigkeitsänderung: < 50%
- Situationsdauer: > 5s

Auch diese Vorschrift arbeitet mit konservativen Parametern, die nur die eindeutigen freien Fahrten identifizieren. Die weitere Verarbeitung der Daten erfolgt, mit Ausnahme der Abstandsberechnung und der Berechnung des eingeschwungenen Zustands, analog zur Vorgehensweise bei den Folgefahrten.

4.2.4 Größen aus der Videoauswertung

Mit Hilfe der Videoauswertung wurden den Messdateien nachträglich diejenigen Daten hinzugefügt, die sich im Fahrzeug während der Fahrt nicht automatisch aufzeichnen ließen. So konnte anhand der Fahrtraumscene ermittelt werden, auf welchem BAB-Fahrestreifen sich der Fahrer befindet sowie welcher Art das Vorausfahrzeug ist (PKW-LKW).

Ebenso wurden verschiedene Aktionen des Probanden sowie der anderen Verkehrsteilnehmer ausgewertet, die in der nachfolgenden Verarbeitung von Interesse sind. Ein Eintrag erfolgte, sobald der Proband selbst überholte oder überholt wurde. Darüber hinaus wurde eingetragen, wenn der voraus fahrende nach rechts oder nach links ausscherte, oder, ob er abbog, einbog oder vor das Versuchsfahrzeug einscherte. Anhand der Videoszene konnte weiterhin festgestellt werden, wann die Versuchsperson am voraus fahrenden Fahrzeug vorbei schaute, um gegebenenfalls Überholmöglichkeiten zu prüfen. In diesen Fällen führen die Probanden soweit nach links versetzt, dass die Kamera, die in der Mitte des Versuchsfahrzeuges angebracht war, am Vorausfahrzeug vorbeiblicken konnte.

Auch das aktuell geltende Tempolimit wurde anhand des Videomitschnitts ausgewertet. Somit ist zugleich sichergestellt, dass auch kurzfristige Änderungen des Tempolimits, wie sie zum Beispiel in Baustellen auftreten können, in der Auswertung berücksichtigt werden.

4.3 Statistische Verfahren

In der vorliegenden Arbeit werden die statistischen Verfahren nach [12] verwendet. Ein signifikantes Testergebnis liegt demnach vor, wenn die aufgestellte Nullhypothese H_0 auf einem Signifikanzniveau (α) von 5% abgelehnt werden kann. Von Hochsignifikanz wird gesprochen bei $\alpha=1\%$, und Höchstsignifikanz liegt vor ab $\alpha=0,1\%$.

4.3.1 Zweistichprobentest

Der Zweistichprobentest nach [12] findet in den Fällen Anwendung, in denen die Lage zweier Mittelwerte zu untersuchen ist. Er setzt unabhängige Stichproben und Varianzhomogenität voraus. Zudem wird vorausgesetzt, dass die Grundgesamtheiten normalverteilt oder der zentrale Grenzwertsatz aufgrund des Stichprobenumfangs ($n > 30$) erfüllt ist. Letzteres Kriterium wurde in allen Einzeluntersuchungen aufgrund der hohen Situationsanzahlen erfüllt.

Wegen seines einfachen Aufbaus lässt sich iterativ das Signifikanzniveau bestimmen, auf dem die Nullhypothese „Beide Mittelwerte sind gleich“ abzulehnen ist. Die Berechnung erfolgt unter Zuhilfenahme der standardnormalverteilten Zufallsvariablen Z . Sind von beiden Stichproben die Mittelwerte (\bar{X}_i), die Varianzen (S_i^2) sowie die Stichprobenumfänge (n_i) bekannt, so kann nach **Gl. 4.3.** die Prüfgröße Z berechnet werden.

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (\text{Gl. 4.3.})$$

Die Inverse der Normalverteilung (vgl. [11]) liefert aus Z das Signifikanzniveau, ab dem die Nullhypothese abzulehnen ist, d.h. die Wahrscheinlichkeit (α -Fehler) mit der die Nullhypothese fälschlicherweise abgelehnt wird, obgleich sie wahr ist.

4.3.2 Regressionsanalyse

Zur Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen zwei Merkmalen findet die lineare Einfachregression nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate Anwendung [12].

Ziel der Regressionsanalyse ist die Berechnung einer linearen Schätzgleichung (**Gl. 4.4.**) zwischen dem Regressand (abhängige Variable - Y) und dem Regressor (unabhängige Variable - X).

$$\hat{y} = b_1 + b_2 x \quad (\text{Gl. 4.4.})$$

Mit:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (\text{Gl. 4.5.})$$

$$b_2 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (\text{Gl. 4.6.})$$

Aussagen über die Qualität der Regression lassen sich anhand der Größen SQR (nicht erklärte Abweichungsquadratsumme, bzw. Quadratsumme der Residuen), SQE (erklärte Abweichungsquadratsumme) und dem Bestimmtheitsmaß r^2 treffen. Letzteres gibt Auskunft darüber, welcher Anteil vom Hundert der Variation durch die Regressionsfunktion erklärt wird.

$$SQE = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Gl. 4.7.})$$

$$SQR = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (\text{Gl. 4.8.})$$

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Gl. 4.9.})$$

$$r^2 = \frac{SQE}{SQT} = \frac{\text{erklärte Abweichungsquadratsumme}}{\text{zu erklärende Abw. quadr. summe}} \quad (\text{Gl. 4.10.})$$

4.3.3 Graphische Datendarstellung

Die zur graphischen Übersicht verwendeten Boxplots ([1], [12]) beschreiben Häufigkeiten der dargestellten Daten. Dabei repräsentiert die ausgezeichnete Box den Interquartilbereich, der dem 25. und 75. Perzentil entspricht. Die innere Linie gibt den Median an. Darüber hinaus werden die Maximal- und Minimalwerte durch Linien markiert. Ausreißer, die um mehr als 1,5 Boxlängen außerhalb des Interquartilbereichs liegen, werden dabei nicht berücksichtigt.

Statistisch signifikante (*), hochsignifikante (**) und höchstsignifikante (***) Mittelwertsunterschiede sind jeweils durch rechteckige Klammern markiert (vgl. Bubb, 2003 [19]).

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuchsreihe vorgestellt. Insgesamt stehen aus den 24 Fahrten 974 Folgefahrtsituationen für die Auswertung zur Verfügung (siehe **Bild 5.1.**). Situationen, die auf nicht auszuwertenden Streckenabschnitten, wie Ortsdurchfahrten, auf der Eingewöhnungsstrecke oder bei Befahren nicht zur Versuchsstrecke gehörender Abschnitte, erhoben wurden, sind hierin nicht mehr enthalten.

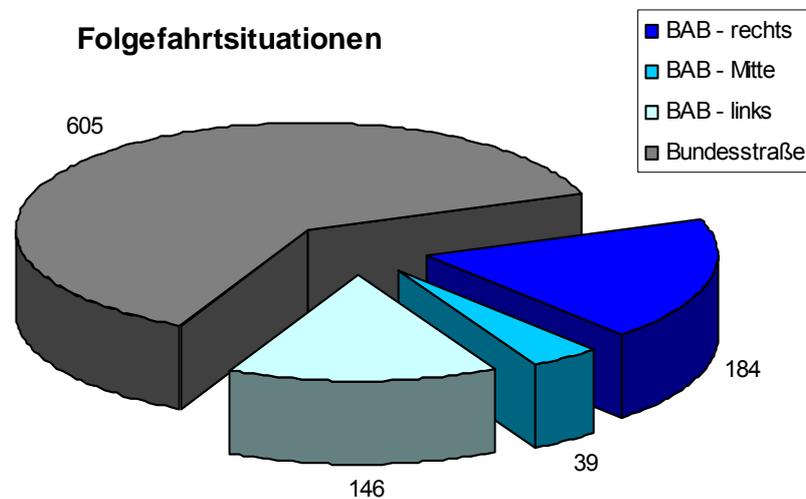


Bild 5.1.: Situationsanzahl Folgefahrten

Darüber hinaus stehen für die Analyse des Einflusses der Geschwindigkeit 610 Situationen in „Freier Fahrt“ zur Verfügung (siehe **Bild 5.2.**).

Die Analyse des Folgefahrtverhaltens der Fahrer erfolgt in Anlehnung an die im Kapitel 3.4.2 erarbeiteten Hypothesen. Bereits dort wurde die Untersuchung in drei Hauptbereiche unterteilt, die hier in Form von Unterkapiteln zu finden sind.

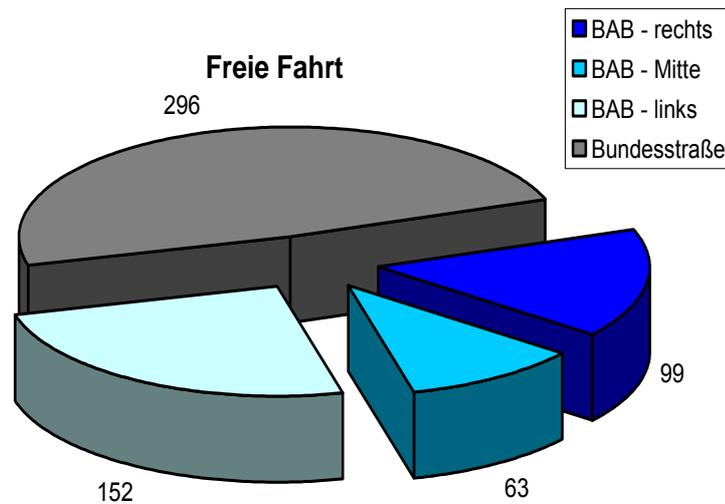


Bild 5.2.: Situationsanzahl Freie Fahrt

5.1 Grundgrößen des Folgefahrtverhaltens

Wie bereits beschrieben, unterliegt das reale Folgefahrtverhalten verschiedenen Einflüssen, die im Weiteren genauer untersucht werden.

Gemäß dem Top-Down-Ansatz (**Bild 3.1.**) können in einer Folgefahrt der Ort, das Vorausfahrzeug und die Witterungsverhältnisse variieren. In der so zu beschreibenden Situation wählt der Fahrer seinen Abstand und seine Geschwindigkeit, woraus sich die nach **Gl. 5.1.** berechenbare Zeitlücke ergibt.

$$\tau = \frac{d}{v} \quad (\text{Gl. 5.1.})$$

In **Bild 5.3.** sind zunächst alle im Verlauf der Versuchsreihe aufgezeichneten Folgeabstände und Zeitlücken unabhängig von sonstigen Einflüssen dargestellt.

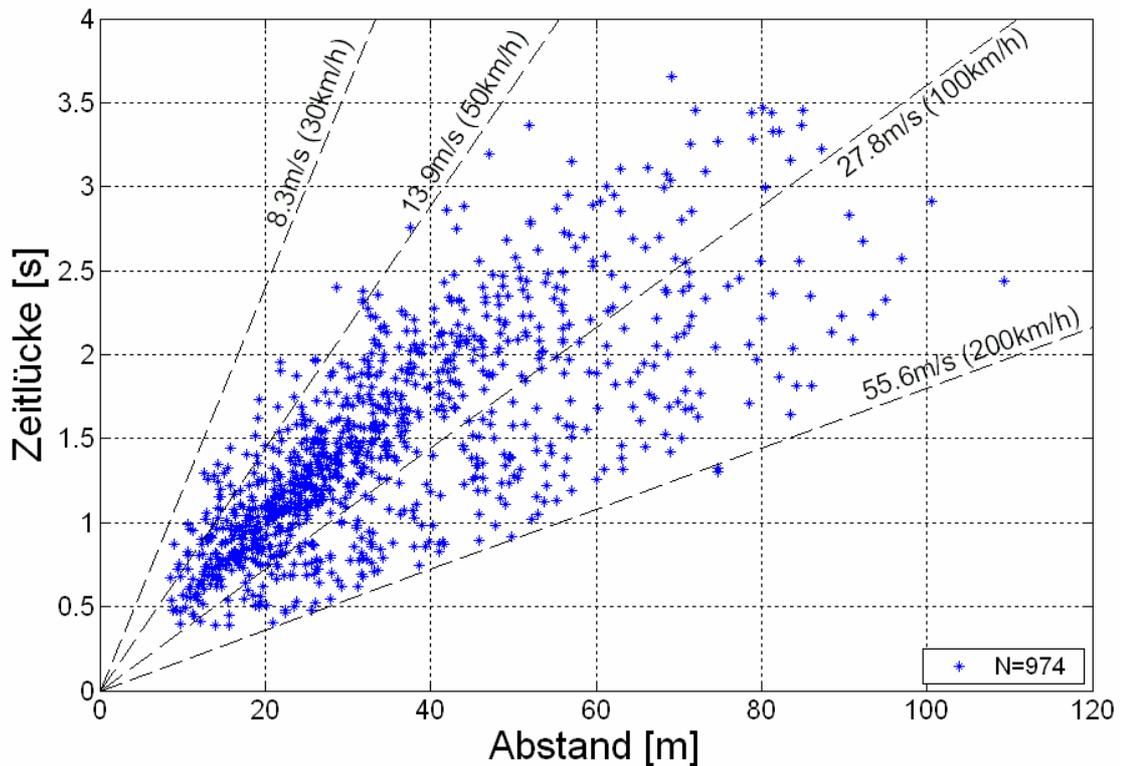


Bild 5.3.: Zeitlücke über Folgeabstand (Basis: alle Folgefahrten aller VP)

Linien konstanter Geschwindigkeit entsprechen gemäß Definition der Zeitlücke Ursprungsgeraden, die im Diagramm für einige typische Werte eingetragen sind. Situationen unterhalb von 30km/h wurden, wie an anderer Stelle bereits beschrieben, verworfen, um mögliche Störungen durch Stop-and-Go-Prozesse in der Analyse zu vermeiden. Das Diagramm veranschaulicht die hohe Situationsdichte in den Versuchsfahrten im Bereich typischer Landstraßengeschwindigkeiten zwischen 50 und 100km/h. Ebenso wird deutlich, dass auf Autobahnen im Bereich oberhalb 100km/h die Situationshäufigkeit abnimmt, da die Fahrer hier häufig die Möglichkeit haben, ein voraus fahrendes Fahrzeug auf einem anderen Fahrstreifen zu überholen. Oberhalb von 200km/h finden praktisch keine Folgefahrten mehr statt. Solche Geschwindigkeiten werden zum einen nur selten gefunden, zum anderen können diese Geschwindigkeiten insbesondere nur dann gefahren werden, wenn dies die Verkehrsdichte zulässt und der linke Fahrstreifen über eine hinreichend große Vorausschauweite frei ist.

Darüber hinaus nimmt die Situationshäufigkeit mit zunehmendem Absolutabstand ab. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass die eingesetzte Abstandsmesstechnik die detektierten, potenziellen Ziele anhand einer Fahrstreifenprädiktion zuordnet, die mit zunehmender Entfernung schwieriger gelingt. Häufigere Zielverluste sind dann die Folge, so

dass bei großen Entfernungen keine durchgängig stabile Zielverfolgung mehr möglich ist und solche Situationen in der Auswertung nicht berücksichtigt werden können.

Werden die Messpunkthäufigkeiten entlang der Linien konstanter Geschwindigkeit beachtet, so finden sich vor allem bei unteren Geschwindigkeiten Verdichtungen bei niedrigen Abständen und Zeitlücken. Dennoch variieren beide Größen über den gesamten Messbereich. Ziel der weiteren Untersuchung ist es, die Einflüsse zu bestimmen, auf denen diese Streuung beruht.

Eine zunächst vermutete Fraktionierung der Messwerte bei der Analyse getrennt nach einzelnen Fahrern konnte nicht nachgewiesen werden.

5.1.1 Stationärer Folgeabstand

Es stellt sich zunächst die Frage, welcher Anteil der Abstandsvarianz alleine durch die gefahrene Geschwindigkeit erklärt werden kann.

Als Hypothese wurde in diesem Zusammenhang formuliert (vgl. 3.4.2.1):

H_0 : „Der stationäre Folgeabstand wird unabhängig von der Geschwindigkeit gewählt.“

Zur Falsifikation der Hypothese wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse einerseits getrennt nach Versuchspersonen, andererseits für die gesamte Versuchsreihe in **Tabelle 5.1.** dargestellt sind. Natürlich können auch andere Regressionsfunktionen als eine lineare untersucht werden. Wegen der großen Streuung wird aber kein über den linearen Ansatz hinaus gehender Erkenntnisgewinn erwartet.

Die je Fahrer durchgeführte Regression des Abstandes über der Geschwindigkeit ergibt, dass alle Fahrer tendenziell den Abstand mit zunehmender Geschwindigkeit erhöhen. Dies drückt sich durch den Koeffizienten b_2 aus, der die Steigung der Regressionsgeraden angibt und in der zugrunde liegenden Analyse für jeden Probanden positiv ist. Es werden Steigungen zwischen 0,36 und 2,31s gefunden, wobei der kleinere Wert beispielsweise bedeutet, dass der Fahrer pro 100km/h (27,8m/s) seinen Abstand nur um 10 Meter erhöht. In der Gesamtregression über alle Versuchspersonen wird der Abstand um ca. 1 Meter pro m/s erhöht. Das entspricht etwa 28 Metern pro 100km/h.

Tabelle 5.1.: Regressionsanalyse: Abstand / Geschwindigkeit

VP	N	b_1 [m]	b_2 [ms/m]	r^2	SQE	SQR	SQT
1	34	-6,06	1,56	0,49	7305	7558	14863
2	35	22,78	0,56	0,09	1012	10004	11017
3	43	-7,58	1,27	0,36	4353	7657	12010
4	42	-16,89	2,15	0,66	10012	5143	15155
5	43	-0,71	1,47	0,38	5109	8194	13303
6	60	9,46	1,24	0,42	5676	7968	13645
7	51	10,03	1,74	0,50	10629	10827	21457
8	35	14,79	0,36	0,08	383	4254	4638
9	40	13,14	0,64	0,34	1062	2104	3166
10	49	19,21	0,89	0,20	1756	7174	8931
11	30	6,46	0,68	0,61	1340	865	2206
12	41	16,46	0,87	0,22	2845	9881	12726
13	38	-3,04	1,41	0,65	6825	3699	10524
14	51	12,19	1,09	0,33	4689	9649	14338
15	36	6,76	1,38	0,32	3809	8031	11841
16	27	2,07	1,50	0,45	3870	4817	8688
17	52	22,87	0,80	0,14	2653	16830	19484
18	52	3,43	1,44	0,38	8260	13699	21959
19	53	3,92	0,81	0,36	4390	7977	12368
20	33	10,67	0,50	0,20	934	3848	4783
21	23	-13,36	2,21	0,29	2229	5495	7724
22	29	-17,96	2,31	0,45	5890	7121	13011
23	28	20,63	0,63	0,14	1125	6951	8077
24	49	12,82	0,77	0,25	1923	5740	7664
alle	974	9,93	1,02	0,24			

Dabei werden Bestimmtheitsmaße gefunden, die zwischen einzelnen Fahrern große Unterschiede aufweisen (0,08 – 0,66). Das bedeutet, dass diejenigen Probanden mit sehr kleinen Bestimmtheitsmaßen den Abstand offensichtlich eher anhand anderer Einflüsse wählen, wohingegen einige Fahrer zu finden sind, bei denen mehr als die Hälfte der Gesamtabstandsvarianz alleine durch die Geschwindigkeit erklärt werden kann. Es sei darauf hingewiesen, dass an dieser Stelle keine hohen Bestimmtheitsmaße erwartet werden, da in der vorliegenden Regression lediglich der Einfluss der Geschwindigkeit untersucht wird und die in den nachfolgenden Kapiteln untersuchten Einflüsse, zum Teil erhebliche Varianz einbringen.

Bei der Regression über die absoluten Folgeabstände aller Fahrer findet sich die Regressionsfunktion:

$$d = 9,93m + v \cdot 1,02s \quad (\text{Gl. 5.2.})$$

mit: d Folgeabstand [m]
 v Geschwindigkeit [m/s],

die in **Bild 5.4.** graphisch dargestellt ist. Dabei werden 24% der Varianz des Abstandes durch die Geschwindigkeit erklärt, was zu einer Falsifikation der Hypothese führt.

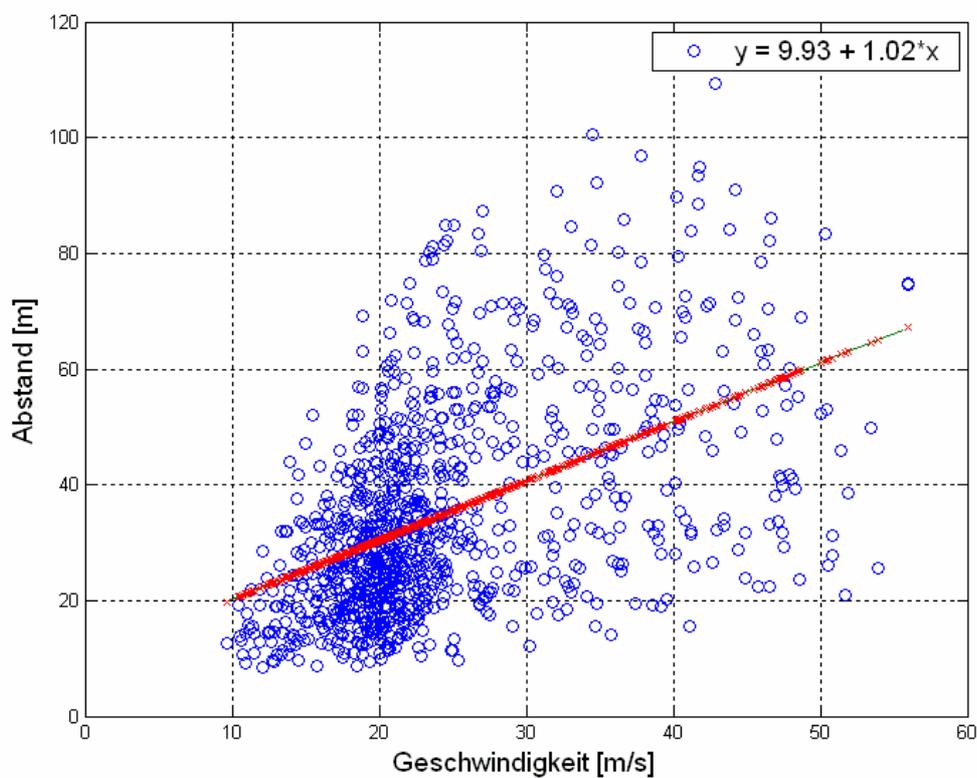


Bild 5.4.: Regressionsgerade Abstand über Geschwindigkeit

Es bleiben aber auch (über alle VPN gesehen) 76% der Varianz ungeklärt, was im Weiteren untersucht wird.

Tabelle 5.2.: Regressionsanalyse: Zeitlücke / Geschwindigkeit

VP	N	b_1 [s]	b_2 [s ² /m]	r^2	SQE	SQR	SQT
1	34	1.06	0.01	0.02	0.27	11.30	11.57
2	35	2.17	-0.02	0.10	1.88	16.90	18.77
3	43	0.69	0.01	0.04	0.31	8.14	8.45
4	42	0.69	0.03	0.20	1.84	7.37	9.22
5	43	1.34	0.00	0.00	0.03	10.71	10.75
6	60	1.95	-0.01	0.04	0.52	13.72	14.24
7	51	2.33	-0.01	0.01	0.16	15.14	15.30
8	35	1.30	-0.01	0.07	0.46	6.06	6.52
9	40	1.70	-0.02	0.18	0.86	4.05	4.92
10	49	2.32	-0.02	0.09	1.23	13.07	14.29
11	30	1.26	-0.01	0.13	0.30	2.01	2.31
12	41	1.97	-0.02	0.07	0.95	12.49	13.45
13	38	1.11	0.01	0.02	0.16	7.72	7.88
14	51	1.89	-0.01	0.03	0.52	15.09	15.62
15	36	1.89	-0.01	0.01	0.13	12.57	12.71
16	27	1.42	0.01	0.01	0.06	5.76	5.82
17	52	2.50	-0.03	0.09	2.72	28.50	31.23
18	52	1.75	-0.01	0.01	0.15	25.09	25.24
19	53	1.09	0.00	0.01	0.11	10.22	10.32
20	33	1.30	-0.01	0.09	0.60	5.87	6.47
21	23	0.69	0.04	0.08	0.75	8.29	9.04
22	29	0.84	0.03	0.09	0.89	8.64	9.53
23	28	2.20	-0.03	0.17	1.78	8.74	10.52
24	49	1.80	-0.02	0.11	1.16	9.66	10.81
alle	974	1.70	-0.01	0.02			

5.1.2 Stationäre Folgezeitlücke

Nach der Feststellung, dass alle Fahrer statistisch mit zunehmender Geschwindigkeit ihren absoluten Abstand vergrößern, stellt sich nun die Frage, welcher Anteil der Varianz der Zeitlücke alleine durch die gefahrene Geschwindigkeit erklärt werden kann.

Die in Kapitel 3.4.2.1 formulierte Hypothese lautet:

H_0 : „Die stationäre Folgezeitlücke wird unabhängig von der Geschwindigkeit gewählt.“

Auch hierzu wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt, deren Ergebnis analog zur Abstandsregression in **Tabelle 5.2.** dargestellt ist.

Zunächst fällt auf, dass die Bestimmtheitsmaße sowohl für die einzelnen Fahrer, als auch bei der Regression über alle Folgezeitlücken der Versuchsreihe wesentlich kleiner sind, als bei der Analyse des Absolutabstandes. Das größte Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,2, für die Gesamtregression sogar nur bei 0,02. Dies hat zwei Ursachen. Zum einen ist der tatsächliche Erklärungsbeitrag der Geschwindigkeit zur Zeitlückenwahl gering, zum anderen ist die Steigung der Regressionsgeraden sehr klein. Definitionsgemäß wird dann auch das Bestimmtheitsmaß zu Null, wenn die Steigung zu Null wird, was gleichbedeutend damit ist, dass die zu erklärende Größe (Zeitlücke) unabhängig von der erklärenden Größe (Geschwindigkeit) auftritt.

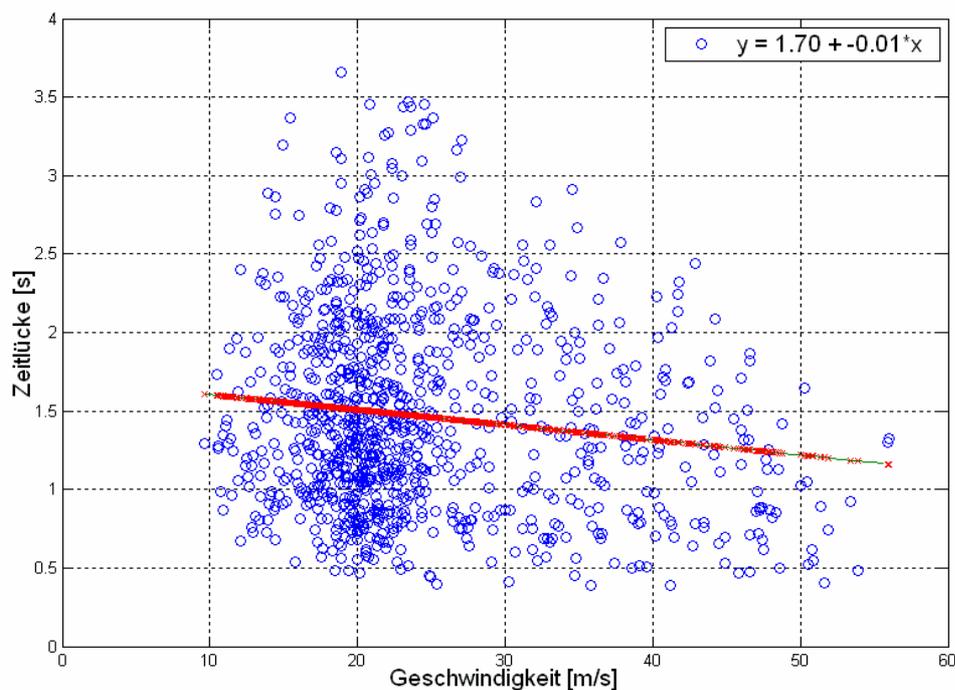


Bild 5.5.: Regressionsgerade Zeitlücke über Geschwindigkeit

Das heißt, dass die Fahrer ihre Folgezeitlücke nicht erkennbar abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit wählen. Die anhand der Darstellung **Bild 5.5.** zu sehende Abnahme großer Zeitlücken mit steigender Geschwindigkeit beruht jedoch auf dem Erfassungsbereich des Radarsensors mit seinen bereits beschriebenen Einschränkungen ($d_{\max}=120\text{m}$).

Erhebliche Unterschiede zwischen den Probanden finden sich auch in den berechneten, durchschnittlich gefahrenen Zeitlücken, die sich im Koeffizient b_1 widerspiegeln. Dort werden Werte von 0,7 bis 2,5 Sekunden ermittelt.

5.1.3 Straßenklasse

In der weiteren Auswertung werden nun die bislang nicht berücksichtigten Einflüsse näher untersucht. Dabei soll anhand der nachfolgenden Hypothese zunächst geklärt werden, welchen Einfluss die befahrene Straßenklasse auf das Folgeverhalten der Fahrer ausübt:

H_0 : „Die Straßenklasse (Landstraße/BAB) hat keinen Einfluss auf das Folgeverhalten (Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke).“

Unterschieden werden die Typen Landstraße und Bundesautobahn. Ortsdurchfahrten wurden, wie bereits erwähnt, nicht untersucht.

Auch in Bezug auf die Straßenklasse werden die Grundgrößen Abstand, Zeitlücke und Geschwindigkeit analysiert.

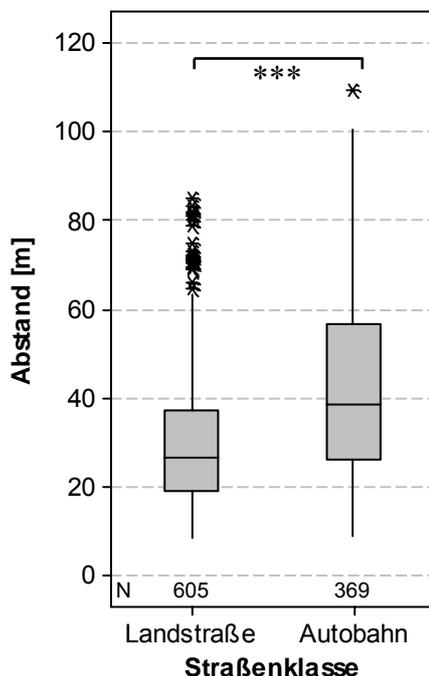


Bild 5.6.: Abstand nach Straßenklasse

Bild 5.6. zeigt die von den Fahrern eingehaltenen Abstände getrennt nach der Straßenklasse. Auf Landstraßen halten die Probanden im Mittel 30,0 Meter Abstand zum voraus Fahrenen. Auf Autobahnen sind dies 43,0 Meter. Die im Boxplot dargestellten Mediane liegen in beiden Fällen etwas unterhalb der genannten Mittelwerte. Dies deutet darauf hin, dass die höheren Mittelwerte auf einzelne Situationen mit besonders großen Abständen, verglichen mit dem Durchschnitt, zurückzuführen sind. Der Zusammenhang ist höchstsignifikant. Die durch die Boxen angedeuteten Interquartilbereiche (25. – 75. Perzentil) lassen darauf schließen, dass die absoluten Abstände auf Autobahnen stärker variieren als auf Landstraßen.

Auch für die Wahl der Zeitlücke ergibt sich ein höchstsignifikanter Unterschied zwischen Landstraße und Bundesautobahn.

Dies mag angesichts der geringen Differenz zwischen den beiden Mittelwerten (Landstraße: 1,52s, BAB: 1,38s) zunächst verwundern.

Wird jedoch der große Stichprobenumfang berücksichtigt, so wird die Schärfe der Aussage klar. Hinsichtlich der Zeitlückenvarianz besteht auf beiden Straßenklassen weitestgehend Homogenität. Auffallend ist allerdings, dass trotz erheblich größeren Abständen auf Bundesautobahnen, die im Mittel immerhin rund 50% höher liegen als auf Landstraßen, dennoch kleinere Zeitlücken erzielt werden.

Die Begründung hierfür liefern die erwartungsgemäß stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die in **Bild 5.8.** dargestellt sind. Durchschnittlich werden auf Autobahnen 115,7km/h gefahren. Auf Landstraßen sind dies nur 70,9km/h. Dabei ist zu beachten, dass es sich hierbei nur um die den Folgefah-
ten zugrunde liegenden Geschwindigkeiten handelt.

Eine Untersuchung der Geschwindigkeiten in freier Fahrt erfolgt später im Rahmen der Fahrstreifenauswertung.

Wie schon im Abstandsverhalten zeigt sich auch hinsichtlich der Geschwindigkeit auf Landstraßen eine erheblich geringere Varianz. Die Ursache hierfür lässt sich mit dem vorliegenden Ansatz nicht vollständig klären. Als mögliche Ursache kommt jedoch in Betracht, dass die Fahrer auf Autobahnen durch häufige Überholmöglichkeiten sowohl Abstand als auch Geschwindigkeit freier wählen können. Letztere ist auf Autobahnen bei höheren Werten oder gar nicht limitiert. In Landstraßensituationen, in denen der Fahrer dem Führungsfahrzeug oft über längere Strecken folgen muss, finden sich häufig Geschwindigkeitsbe-

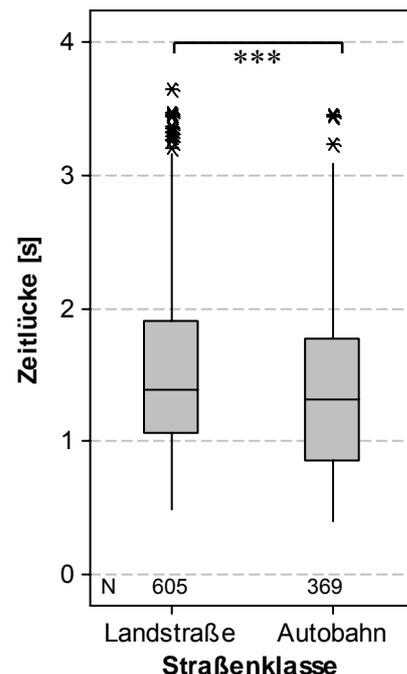


Bild 5.7.: Zeitlücke nach Straßenklasse

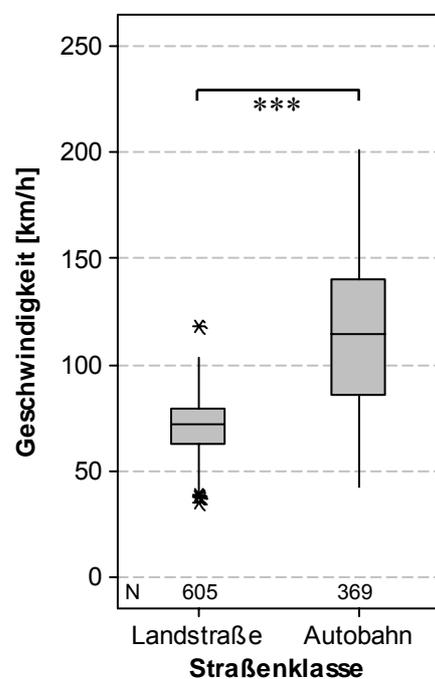


Bild 5.8.: Geschwindigkeit nach Straßenklasse

grenzungen bei 70km/h, höchstens aber bei generell 100km/h.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Hypothese auf dem Niveau „höchstsignifikant“ sowohl hinsichtlich des Abstandes als auch der Zeitlücke sowie der Geschwindigkeit falsifiziert werden kann.

5.1.4 Gewählter Fahrstreifen

Nach der Analyse des Folgefahrtverhaltens auf unterschiedlichen Straßenklassen, soll im Weiteren der Einfluss der verschiedenen Fahrstreifen auf Bundesautobahnen untersucht werden. Die zu falsifizierende Hypothese lautet:

H_0 : „Das Folgeverhalten (Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke) ist unabhängig vom befahrenen Fahrstreifen auf Bundesautobahnen.“

In **Bild 5.9.** ist die Abstandswahl der Fahrer getrennt nach Fahrstreifen dargestellt.

Auf dem rechten Fahrstreifen werden mit einem Durchschnitt von 40,5 Metern die kleinsten Abstände gefahren und zwar signifikant kleiner als auf dem mittleren (49,8m). Dabei fällt auf, dass rechts der im Boxplot dargestellte Median deutlich niedriger liegt als der Mittelwert, was auf einzelne sehr große Abstände hindeutet. Auf dem linken Fahrstreifen werden mit 44,3 Metern im Mittel keine signifikanten Unterschiede zu den beiden anderen gefunden. Aber auch hier liegen vereinzelte, sehr große Abstände vor, die den Mittelwert erhöhen.

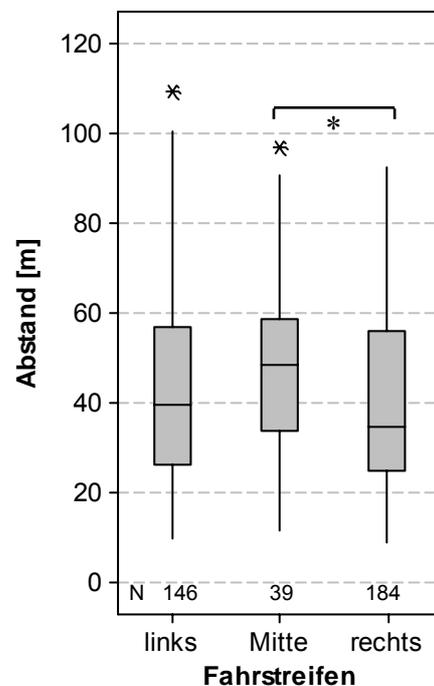


Bild 5.9.: Abstand nach Wahl des Fahrstreifens

Bei der Analyse der von den Fahrern gewählten Zeitlücken, die in **Bild 5.10.** dargestellt sind, ist zu sehen, dass links die kleinsten Zeitlücken gefahren werden. Sie sind dort im Mittel mit 1,14 Sekunden hochsignifikant kleiner als auf dem mittleren Fahrstreifen (1,40s) und sogar höchstsignifikant kleiner als auf dem rechten (1,57s).

Einen noch klareren Zusammenhang zeigt die Darstellung der gefahrenen Geschwindigkeiten in **Bild 5.11.** Es ist zu sehen, dass links mit durchschnittlich 141,4km/h deutlich schneller gefahren wird als in der Mitte (127,2km/h) und dort nochmals schneller als rechts mit 92,8km/h. Bis auf erstgenannten hoch signifikanten Zusammenhang sind die anderen jeweils höchstsignifikant.

Damit wird die gegenläufige Tendenz zwischen Geschwindigkeit und Zeitlücke auf den verschiedenen Fahrstreifen deutlich, was zu den geringen Unterschieden des Absolutabstands (vgl. **Bild 5.9.**) führt.

Offensichtlich vergrößern die Fahrer mit zunehmender Geschwindigkeit den Abstand zum voraus Fahrenen nicht, sondern nehmen eine kleiner werdende Zeitlücke in Kauf.

Die Hypothese, die von einer Einflussfreiheit des Fahrstreifens bezüglich des Folgeverhaltens ausging, kann auch als falsifiziert gelten.

Neben der Analyse von Folgefahrtsituationen ist im Hinblick auf zukünftige Systeme auch die Untersuchung der Geschwindigkeiten in freier Fahrt von Interesse. Diese Systeme werden möglicherweise die heutige, vom Fahrer zu

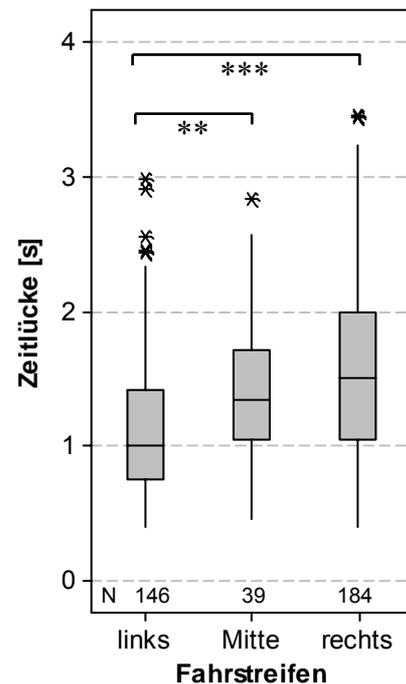


Bild 5.10.: Zeitlücke nach Wahl des Fahrstreifens

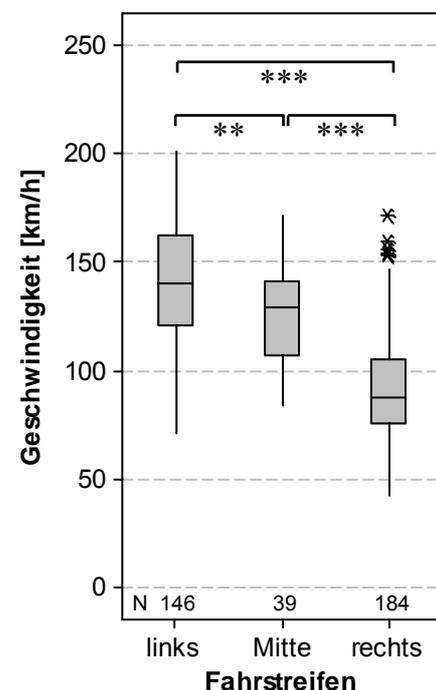


Bild 5.11.: Geschwindigkeit nach Wahl des Fahrstreifens

wählende Wunschgeschwindigkeit beispielsweise aus einer digitalen Karte ermitteln und selbstständig vorgeben können. **Bild 5.12.** zeigt die gemessenen Geschwindigkeiten in freier Fahrt.

Es können jeweils höchstsignifikante Unterschiede zwischen dem linken (163,7km/h), dem mittleren (147,5km/h) und dem rechten Fahrstreifen (114,2km/h) nachgewiesen werden. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass rechts der Mittelwert der Stichprobe unter dem Median liegt. Daraus ergibt sich, dass dort Ausreißer in Richtung kleinerer Geschwindigkeiten zu verzeichnen sind, die aus stockendem Verkehr her-rühren. Die Standardabweichung ist mit 42,5km/h dort ebenfalls am größten.

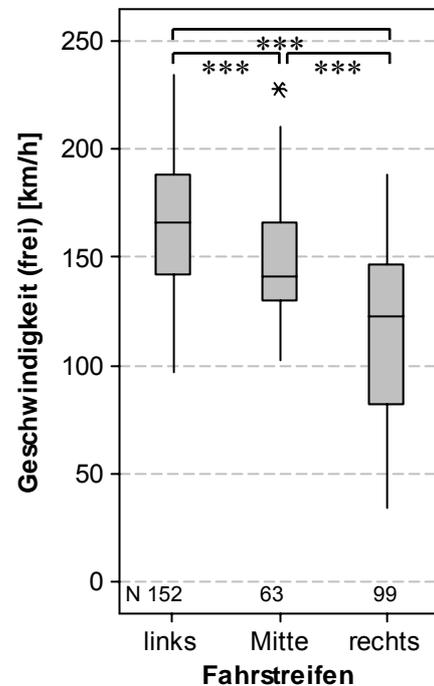


Bild 5.12.: Geschwindigkeit bei Freier Fahrt über dem Fahrstreifen

5.1.5 Vorausfahrzeug

Neben der möglichen Variation des Ortes kann, wie eingangs erwähnt, in Folgefahrtsituationen auch das Vorausfahrzeug variieren. Die zugehörige Hypothese lautet:

H_0 : „Die Art des Vorausfahrzeuges (PKW/LKW) hat keinen Einfluss auf das Folgeverhalten (Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke).“

Die Art der Vorausfahrzeuge wird durch die Unterscheidung in Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge festgelegt. Zu unterscheiden ist ferner, wo, d.h. auf welche Straßenklasse, die Folgefahrt stattfindet, da die Probanden auf Autobahnen meist Gelegenheit haben, das Führungsfahrzeug zu überholen. Im Gegensatz hierzu sind sie auf Landstraßen häufig dazu gezwungen über eine längere Zeitdauer einem voraus Fahrenden zu folgen.

Auch hier soll zunächst das Abstandsverhalten analysiert werden. **Bild 5.13.** zeigt die von den Versuchspersonen gefahrenen Abstände getrennt nach den Straßenklassen Landstraße und Autobahn sowie die Gesamtheit aller Folgefahrtsituationen. In allen Klassen werden höchstsignifikante Unterschiede der Abstandsmittelwerte gefunden. Stets halten die Fahrer hinter Nutzfahrzeugen geringere Abstände als hinter Personenkraftwagen. Der Unterschied ist auf Landstraßen weniger stark ausgeprägt (LKW: 25,1m, PKW: 30,9m) als auf Autobahnen (LKW: 32,4m, PKW: 44,9m). Die geringere Varianz in den

Landstraßensituationen beruht, wie noch zu sehen sein wird, auf der größeren Homogenität der Geschwindigkeit sowie auf der geringeren Parameteroffenheit im Vergleich zur Autobahn. Auch an dieser Stelle ist es nicht das Ziel, über die Intention des Fahrers zu spekulieren. Allerdings zeigt sich auch hier, dass auf Autobahnen größere Abstände gefahren werden.

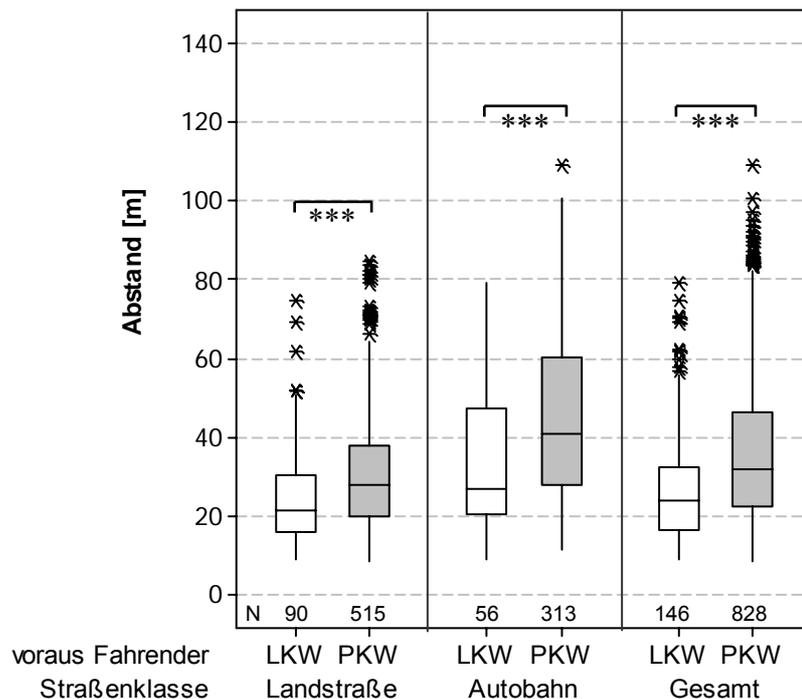


Bild 5.13.: Abstand nach Art des Vorausfahrzeuges

Die in **Bild 5.14.** dargestellten Zeitlücken zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen dem Folgen hinter einem PKW im Vergleich zum LKW in Landstraßensituationen. Hier werden hinter Personenwagen 1,54 und hinter Lastwagen 1,39s gefahren, jeweils, da die Mittelwerte größer sind als die Mediane, mit Ausreißern nach oben. Die deutlich erhöhten Abstände hinter PKW auf Autobahnen führen deshalb nicht zu größeren Zeitlücken, da sie bei wesentlich höheren Geschwindigkeiten stattfinden (siehe **Bild 5.15.**). Dies beruht natürlich auf der begrenzten Höchstgeschwindigkeit von Lastkraftwagen, die in dieser Form bei PKW nicht vorgefunden werden. Die LKW-Geschwindigkeiten bis zu über 140km/h auf Autobahnen sind leichten Nutzfahrzeugen der Lieferwagenklasse zuzuordnen, die in dieser Arbeit ebenfalls definitionsgemäß als Lastkraftwagen behandelt werden.

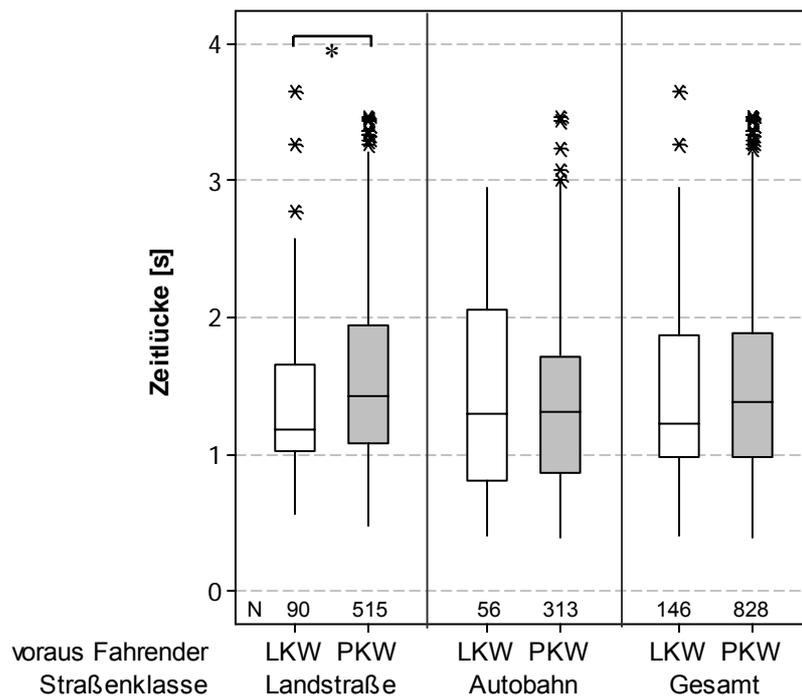


Bild 5.14.: Zeitlücke nach Art des Vorausfahrzeuges

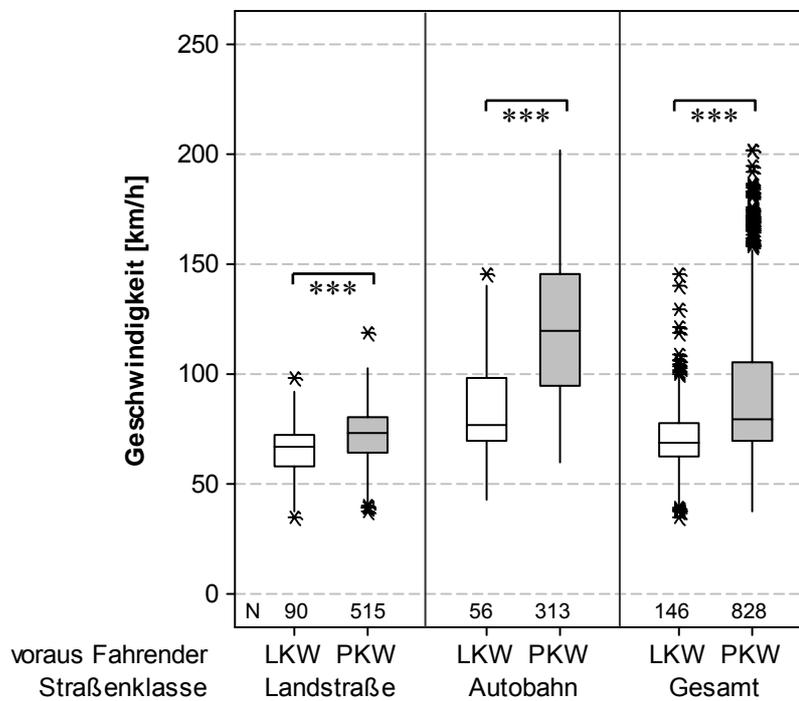


Bild 5.15.: Geschwindigkeit nach Art des Vorausfahrzeuges

Bezüglich der Geschwindigkeit lassen sich erwartungskonform stets höchstsignifikante Unterschiede zwischen verschiedenartigen Vorausfahrzeugen nachweisen, wobei die Mittelwerte mit einer Ausnahme auf dem Niveau der Mediane liegen. Lediglich bei den Balken „Gesamt“ liegen die Durchschnittsgeschwindigkeiten mit 71,9km/h hinter LKW und 90,7km/h hinter PKW über den in der Abbildung dargestellten Medianen.

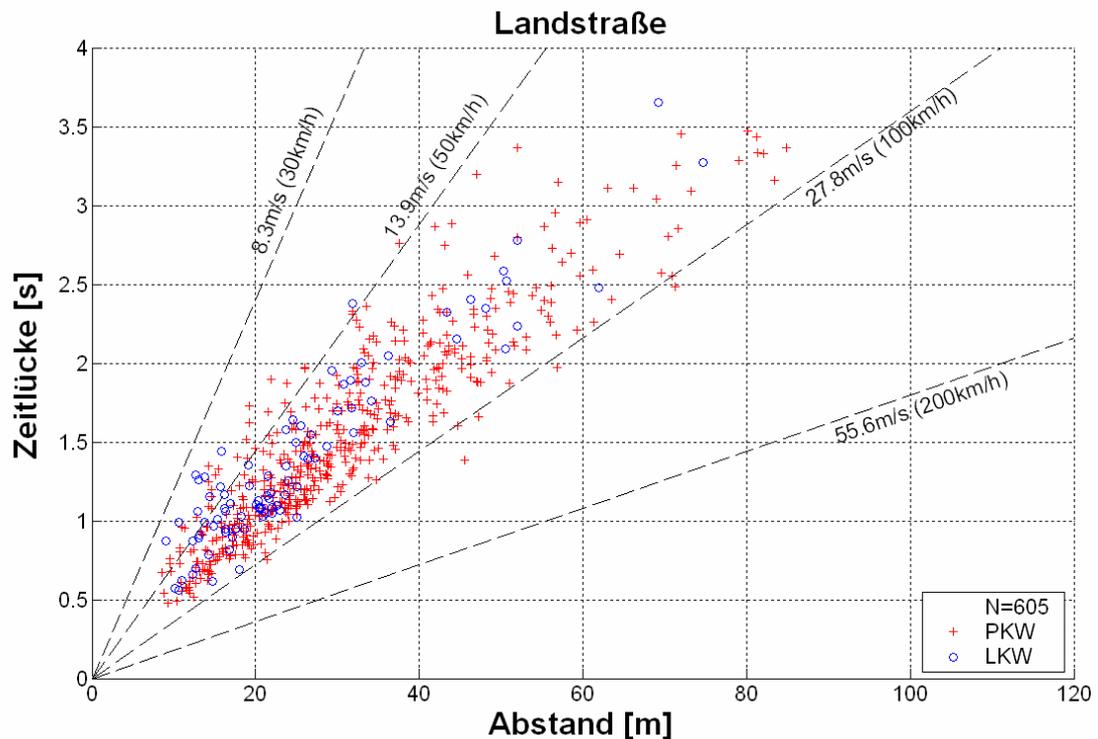


Bild 5.16.: Zeitlücke über Folgeabstand Landstraße

Die **Bild 5.16.** und **Bild 5.17.** zeigen die entsprechende Fraktionierung auf der Landstraße und der Autobahn.

Mit den nachgewiesenen, zum Teil höchstsignifikanten Mittelwertsunterschieden kann die eingangs aufgestellte Hypothese, die Art des Vorausfahrzeuges habe keinen Einfluss auf das Folgeverhalten, als widerlegt angesehen werden. Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Fahrer hinter LKW grundsätzlich kleinere Abstände einhalten als hinter PKW. Aufgrund der höheren Geschwindigkeiten hinter PKW geht dies jedoch nicht mit einer Erhöhung der Zeitlücke einher.

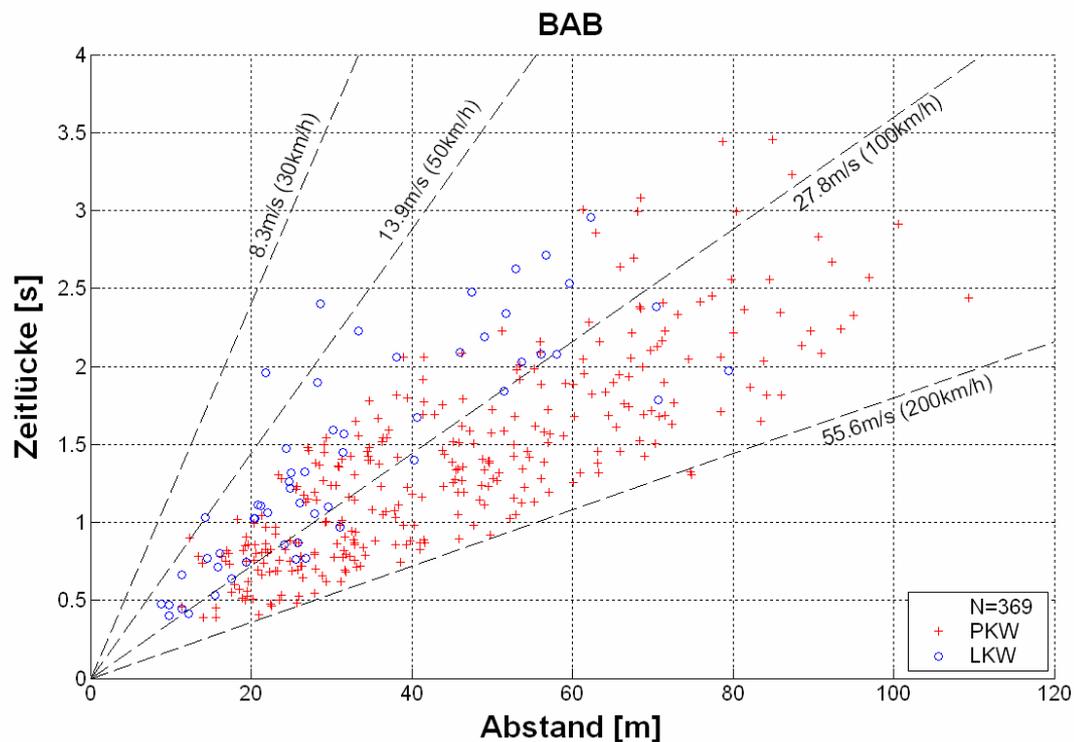


Bild 5.17.: Zeitlücke über Folgeabstand Bundesautobahn

5.1.6 Zwischenfazit

Zwischen den Grundgrößen des Folgefahrtverhaltens bestehen zum Teil deutliche Abhängigkeiten. So konnte gezeigt werden, dass alle Fahrer mit zunehmender Geschwindigkeit den absoluten Abstand erhöhen. Eine Abhängigkeit der Zeitlücke von der Geschwindigkeit kann jedoch nicht nachgewiesen werden. Vielmehr wird sie, wenn auch abhängig von weiteren Einflüssen, über der Geschwindigkeit als konstant angesehen.

Sowohl die befahrene Straßenklasse als auch der gewählte Fahrstreifen haben erheblichen Einfluss auf das Folgeverhalten. Im Vergleich zwischen Bundesautobahn und Landstraße werden stets höchstsignifikant unterschiedliche Grundgrößen vorgefunden. So steigen auf Autobahnen Geschwindigkeiten und Abstände, und die Zeitlücken sinken. Bezüglich der Wahl des Fahrstreifens finden sich die absoluten Abstände weitestgehend auf gleichem Niveau. Die Geschwindigkeiten hingegen steigen höchstsignifikant umso stärker, je weiter links gefahren wird, wobei sich die Zeitlücken ebenso deutlich reduzieren, obgleich sie über alle Situationen im Mittel konstant bleiben (vgl. Kapitel 5.1.2). Die Auswertung der Geschwindigkeiten in freier Fahrt führt ebenfalls zu jeweils höchstsignifikanten Anstiegen vom rechten bis hin zum linken Fahrstreifen.

Auch die Art des Vorfahrzeuges hat deutlichen Einfluss auf die Grundgrößen des Folgeverhaltens. So werden hinter LKW höchstsignifikant kleinere Abstände und Ge-

schwindigkeiten erzielt. Dieser Zusammenhang ist sowohl auf Landstraßen als auch auf Autobahnen und darüber hinaus auch in der Gesamtbetrachtung gültig.

5.2 Einfluss der Dynamik auf das Folgefahrtverhalten

Nach der Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen den Grundgrößen des Folgefahrtverhaltens und äußeren, situativen Einflüssen, wie Variation des Ortes und des Vorausfahrzeuges, sind nun die Einflüsse der Dynamik der Fahrt zu untersuchen. Dabei handelt es sich um intrinsische Größen, die der Fahrer aufgrund persönlicher Eigenschaften und seiner Intention einstellt. Zwar ist es nicht das Ziel, die Motivation des Fahrers bei der Wahl dieser Größen zu ergründen, es stellt sich aber dennoch die Frage, wie sich das Folgefahrtverhalten auf Basis der vom Fahrer gewählten Dynamik der Fahrt objektiv messbar ändert. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass der Fahrer in der Folgefahrt selbst kaum noch Einfluss auf die Dynamik, also auf die möglichen Änderungen der Bewegungsgrößen hat, da ihm die Geschwindigkeit durch das Führungsfahrzeug in engen Grenzen vorgegeben wird. Deshalb wird, wie bereits bei der Definition der Kennwerte zur Beschreibung der Dynamik der Fahrt erläutert, jeweils die Fahrthistorie vor der zu untersuchenden Folgefahrt ausgewertet. Zur Analyse der Fahrthistorie wurden die Kennwerte „maximale Verzögerung“, „maximale Beschleunigung“ und „Tempolimitnutzung“ definiert, anhand derer die Änderungen des Folgeverhaltens beschrieben werden. Darüber hinaus wird beschrieben, wie Beschleunigungen und Verzögerungen wechselseitig voneinander abhängen.

Löst sich die Folgefahrt nicht durch Ausscheren oder Abbiegen des voraus Fahren den selbstständig auf, so wird der Fahrer, der nach höherer Dynamik strebt, nach Überholmöglichkeiten suchen und diese eventuell nutzen. Um diese Einflüsse zu berücksichtigen, werden das „Vorbeischauen“ sowie der Kennwert „Anzahl der Überholungen“ in der Vergangenheit mit in die Analyse einbezogen.

5.2.1 Einfluss der maximalen Verzögerungen

Zunächst ist der Einfluss der maximalen Verzögerungen in der Fahrthistorie zu analysieren.

Als Hypothese wurde aufgestellt:

H_0 : „Die Abstandswahl ist unabhängig von der Höhe der in der Fahrhistorie aufgetretenen maximalen Verzögerungen.“

Diese Hypothese wird im Weiteren überprüft.

Die Darstellung des Kennwertes „maximale Verzögerungen“ in **Bild 5.18.** erfolgt metrisch intervallskaliert in den Verzögerungsklassen 0 bis -1, -1 bis -2 und über -2 m/s^2 . In den Boxplots sind die Ergebnisse aller Folgefahrten auf Autobahnen und Landstraßen eingetragen.

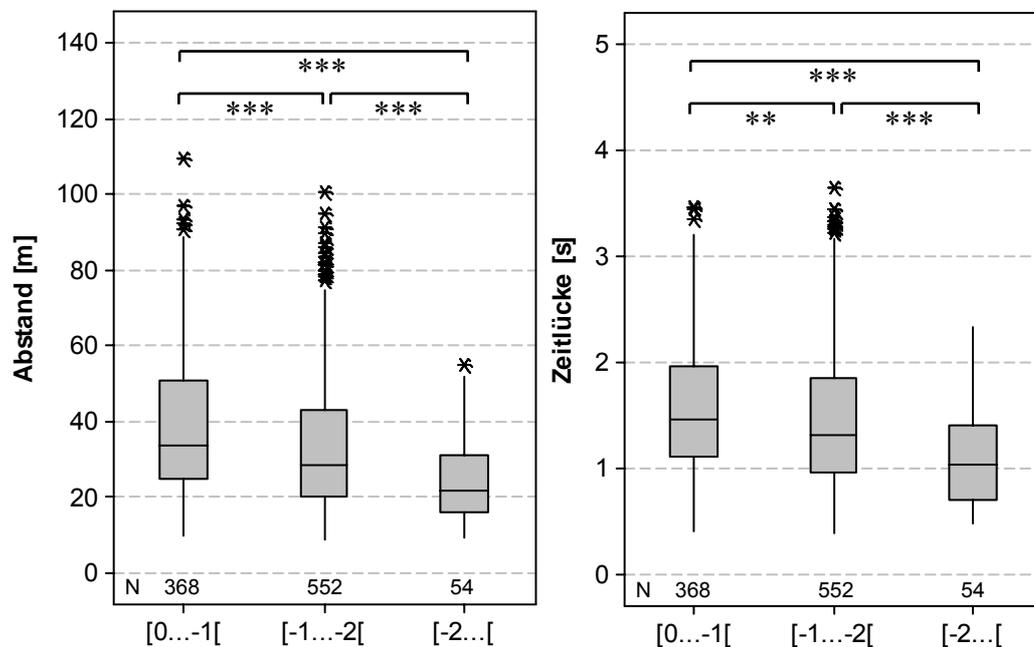


Bild 5.18.: Dynamischer Kennwert „maximale Verzögerung“ [m/s^2]

Hinsichtlich der Abstandswahl finden sich zwischen allen Kennwertklassen jeweils höchstsignifikante Unterschiede. Die Fahrer wählen somit immer kürzere Abstände, je stärker sie in den der Situation vorausgegangen 120 Sekunden verzögert haben. Auffällig ist dabei, dass die geringste Abstandsvarianz in der Klasse der besonders hohen Verzögerungen angetroffen wird. Auch der Mittelwert von 24,2 Metern liegt nur geringfügig unter dem dargestellten Median, woraus hervorgeht, dass praktisch kein Fahrer im Anschluss an einen Fahrabschnitt, in dem er mit höchsten Verzögerungen gefahren ist, große Abstände einhält. In den beiden niedrigeren Klassen finden sich hingegen auch

sehr große Abstandswerte, die Mittelwerte liegen entsprechend über den Medianen (vgl. **Tabelle 5.3.**).

Auch bezüglich der Zeitlücken sind zwischen den einzelnen Kennwertklassen hoch- bis höchstsignifikante Unterschiede mit der gleichen Änderungsrichtung festzustellen. Die Zeitlückenvarianzen sowie die relativen Lagen der Mediane und Mittelwerte entsprechen denen der Abstandsanalyse mit den bereits diskutierten Konsequenzen.

In **Tabelle 5.3.** sind die mittleren Abstände und Zeitlücken sowie die Ergebnisse der Signifikanztests getrennt nach Straßenklassen eingetragen. Auffällig ist, dass sowohl die größten Abstands- als auch Zeitlückendifferenzen stets zwischen der mittleren und höchsten Verzögerungsklasse auftreten.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass den in Klammern angeführten Ergebnissen der Signifikanztests in den Autobahnsituationen nicht vertraut werden darf. In der Klasse der höchsten Verzögerung ist durch die geringe Situationsanzahl der zentrale Grenzwertsatz verletzt und der Test somit ungültig.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die zum Einfluss maximaler Verzögerungen aufgestellte Hypothese mit sehr geringer Irrtumswahrscheinlichkeit abgelehnt werden kann.

Verzögerung		0...-1	-1...-2	-2...
Autobahn	d [m]	45,5	41,0	32,0
	Signifikanz	*		
			(*)	
		(***)		
	τ [s]	1,50	1,27	0,96
	Signifikanz	***		
		(*)		
(***)				
N	182	177	(10)	
Landstraße	d [m]	32,4	29,7	22,4
	Signifikanz	*		

	τ [s]	1,63	1,50	1,14
	Signifikanz	*		

N	188	375	42	
Gesamt	d [m]	38,8	33,3	24,2
	Signifikanz	***		

	τ [s]	1,57	1,43	1,10
	Signifikanz	**		

N	370	552	52	

Tabelle 5.3.: Abstand/Zeitlücke nach Kennwert „maximale Verzögerung“

5.2.2 Einfluss der maximalen Beschleunigungen

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung des Einflusses der Dynamik der Fahrt ist die Analyse der in der Fahrthistorie vom Fahrer gewählten maximalen Beschleunigungen.

Als zu falsifizierende Hypothese wird aufgestellt:

H_0 : „Die Abstandswahl ist unabhängig von der Höhe der in der Fahrthistorie aufgetretenen maximalen Beschleunigungen.“

Die Untersuchung des Kennwertes wird analog zum Vorgehen bei der Verzögerung in drei Beschleunigungsklassen, hier allerdings 0 bis 0,75, 0,75 bis 1,5 und über 1,5 m/s^2 durchgeführt. Im Gegensatz zur Verzögerung, bei der Fahrer auch bei höchsten Geschwindigkeiten mit nahezu einfacher Erdbeschleunigung bremsen können, macht sich beim Beschleunigen ein deutlicher Geschwindigkeitseinfluss bemerkbar. Auf diesen Zusammenhang wurde bei der Kennwörterstellung bereits hingewiesen. Eine grafische Darstellung folgt bei der Analyse der wechselseitigen Abhängigkeiten der Größen, die die Dynamik der Fahrt beschreiben.

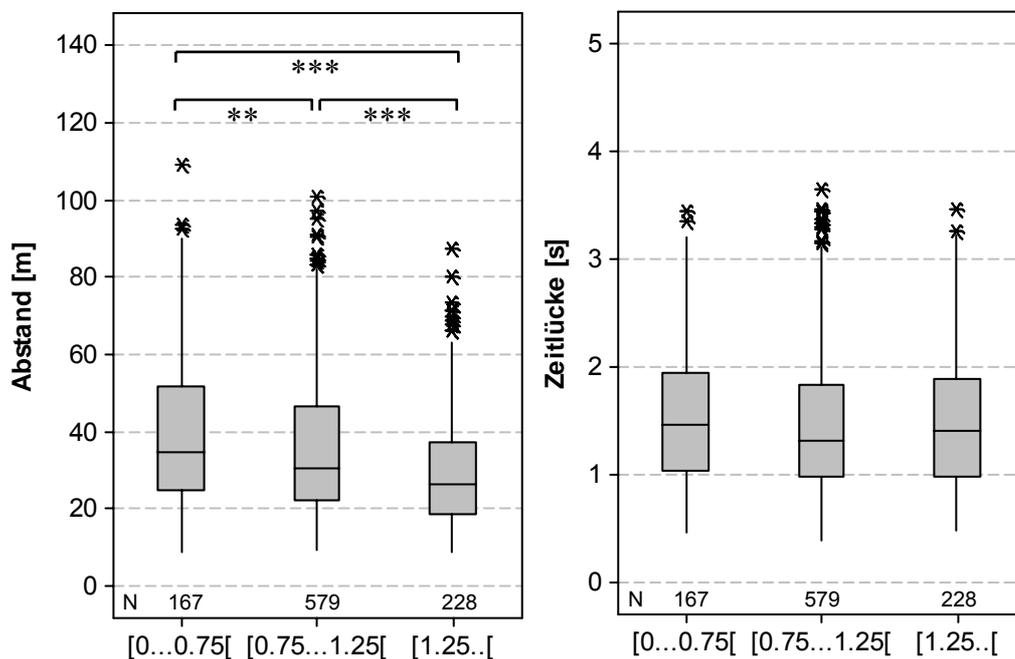


Bild 5.19.: Dynamischer Kennwert „maximale Beschleunigung“ [m/s^2]

Bild 5.19. zeigt den Einfluss der in den letzten 120 Sekunden vor der zu untersuchenden Folgefahrt von den Versuchspersonen gewählten maximalen Beschleunigungen. Anhand dieser Darstellung werden für die Wahl des Abstandes deutliche Unterschiede in den

verschiedenen Kennwertklassen gefunden. Eine Abhängigkeit der Zeitlückenwahl von den maximalen Beschleunigungen in der Fahrhistorie kann nicht nachgewiesen werden.

Allerdings ist festzustellen, dass die Klasse mit den höchsten Beschleunigungen auf Autobahnen mit 19 Situationen nur gering besetzt ist. Auf Landstraßen wird jedoch rund ein Drittel aller aufgezeichneten Situationen in dieser Klasse gefunden. Die Klassen mit den geringsten Beschleunigungen zeigen umgekehrtes Verhalten. Wie später noch zu sehen sein wird, variieren auf Autobahnen im Gegensatz zur Landstraße die maximalen Beschleunigungen nur in einem geringen Bereich zwischen etwa 0,5 und 1,5m/s². Dies liegt am bereits beschriebenen, sinkenden Beschleunigungsvermögen des Fahrzeuges bei Autobahngeschwindigkeiten.

Eine tiefer gehende Analyse des Fahrerhaltens führt jedoch sowohl auf Landstraßen wie auch auf Autobahnen zu dem Ergebnis, dass das Folgeverhalten mit hoher Varianz ohne erkennbare Abhängigkeit von den maximalen Beschleunigungen gewählt wird. Den scheinbar deutlichen Unterschieden im Abstandsverhalten über alle Situationen liegt eine Konfundierung zugrunde. Sie beruht auf der Addition vieler Situationen mit großen Abständen in Autobahnsituationen und einer hohen Anzahl an Landstraßensituationen mit geringen Abständen. Dies führt zu einer polaren Anhäufung unterschiedlicher Abstandswerte bei zufällig ebenso unterschiedlichen Größen des Kennwerts „maximale Beschleunigung“, so dass anschließend die ursächlichen Einflüsse nicht mehr trennbar sind (**Tabelle 5.4.**). In diesem Fall kann die zuvor aufgestellte Hypothese somit weder falsifiziert noch bestätigt werden.

Tabelle 5.4.: Abstand/Zeitlücke nach Kennwert „maximale Beschleunigung“

Verzögerung		0..0,75	0,75.1,5	1,5..
Autobahn	d [m]	46,13	41,76	42,19
	Signifikanz	-		
			-	
		-		
	τ [s]	1,46	1,33	1,60
Signifikanz	-			
		-		
	-			
N	101	249	19	
Landstraße	d [m]	31,95	30,52	28,55
	Signifikanz	-		
			-	
		-		
	τ [s]	1,69	1,52	1,46
Signifikanz	-			
		-		
	*			
N	66	330	209	
Gesamt	d [m]	40,52	35,35	29,69
	Signifikanz	**		

	τ [s]	1,55	1,44	1,47
Signifikanz	-			
		-		
	-			
N	167	579	228	

5.2.3 Querabhängigkeiten dynamischer Größen

An dieser Stelle soll geklärt werden, welche Zusammenhänge zwischen den Größen „maximale Verzögerung“ und „maximale Beschleunigung“ bestehen. Als wiederum zu widerlegende Hypothese wird aufgestellt:

H_0 : „Die dynamischen Größen maximale Beschleunigung und maximale Verzögerung sind unabhängig.“

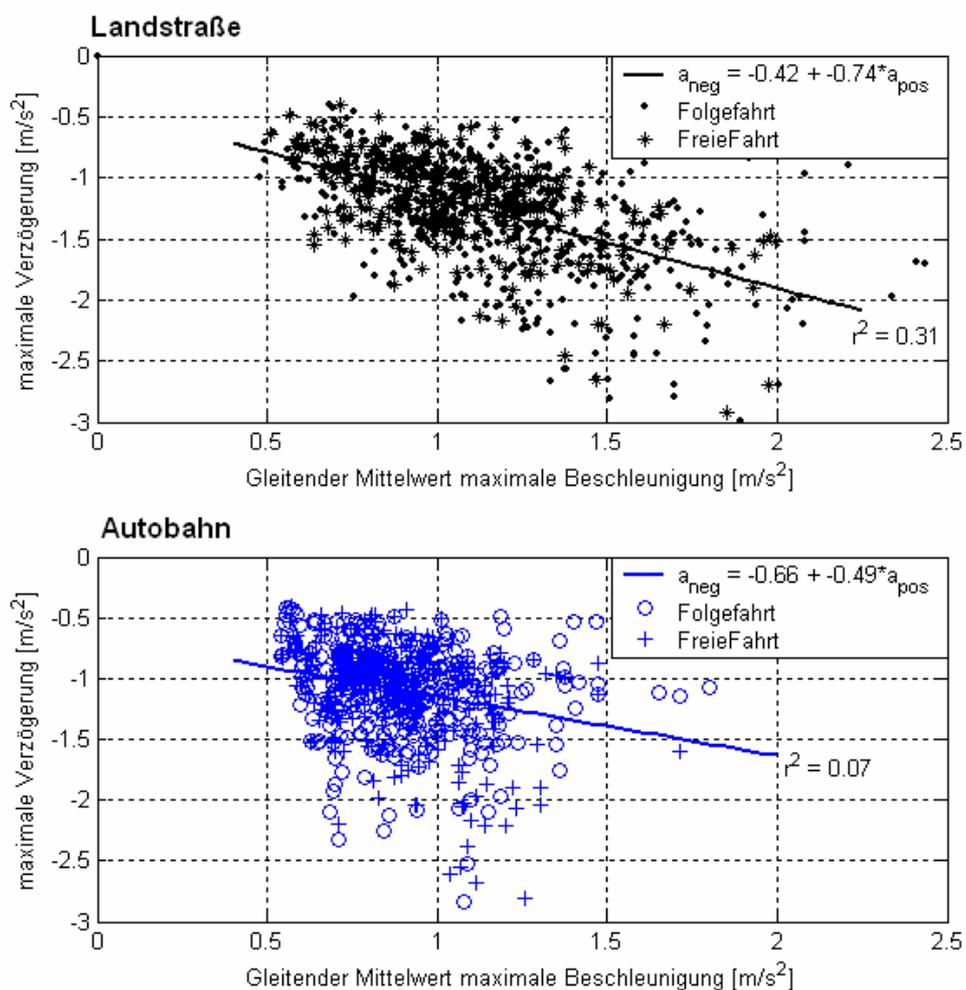


Bild 5.20.: Beschleunigungskennwerte nach Straßenklassen

Bild 5.20. zeigt die Kennwerte maximale Verzögerung und maximale Beschleunigung getrennt nach Straßenklassen in Folgefahrt und freier Fahrt.

Der Darstellung für die Landstraße ist ein Erklärungsbeitrag von 31% zu entnehmen. Das heißt, dass mit steigendem Beschleunigungswert auch der Verzögerungswert dem Betrag nach steigt. Auffällig ist, dass keine Fraktionierung zwischen Situationen aus freier Fahrt und solchen in Folgefahrt stattfindet. In Autobahnsituationen ist der Erklärungsbeitrag der einen zur anderen Größe nahezu vernachlässigbar. Die Ursache hierfür liegt in der geringen Variation des Beschleunigungskennwerts bei hohen Tempi, was anschaulich in **Bild 5.21.** zu sehen ist. Eine Fraktionierung nach freien und Folgefahrten findet auch hier nicht statt.

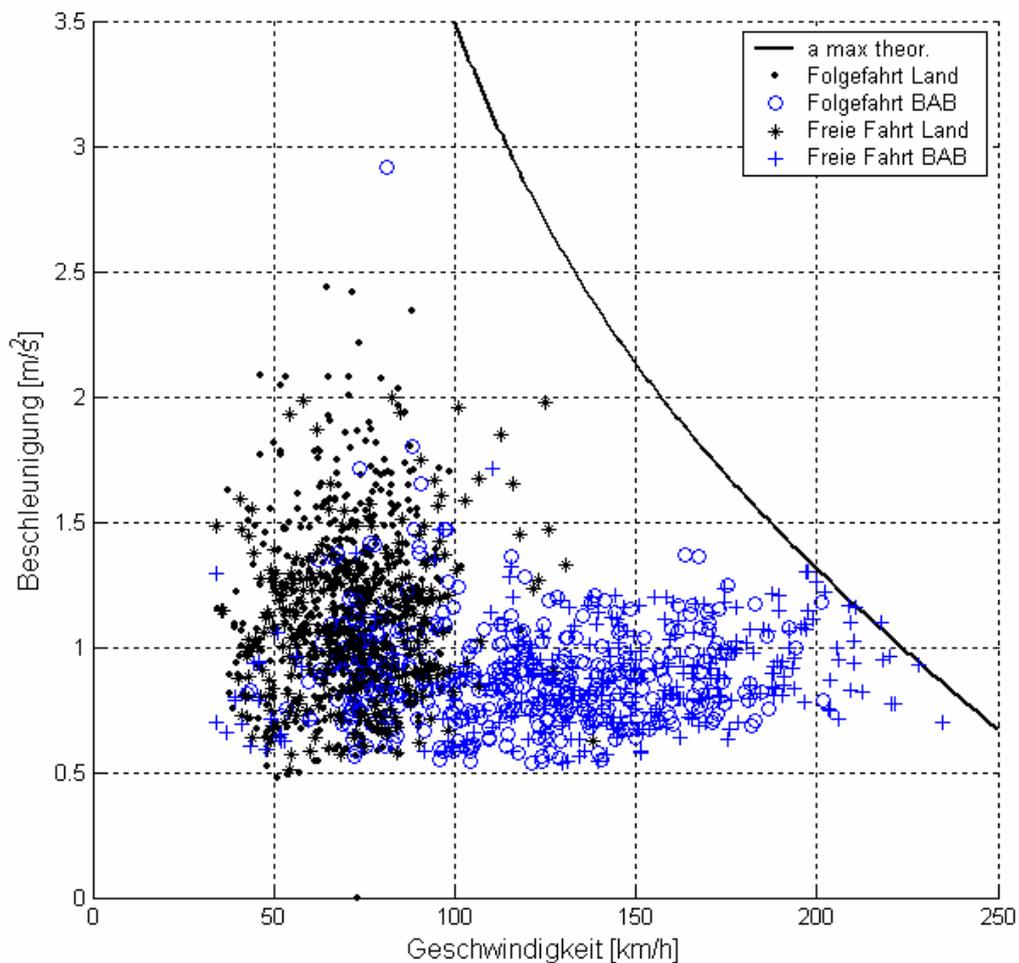


Bild 5.21.: Beschleunigungskennwerte über der Geschwindigkeit

Die durchgezogene Linie mit hyperbelartigem Verlauf repräsentiert die theoretische Maximalbeschleunigung in der Ebene bei Windstille, die das Fahrzeug erreichen kann. Zugrunde liegen dieser theoretischen Berechnung die Herstellerangaben aus **Tabelle 5.5.** Berücksichtigt wurden bei der Berechnung die Luft- und Radwiderstandskräfte.

Bild 5.21. zeigt den auf Landstraßen über weite Bereiche streuenden Wert des Kennwerts maximale Beschleunigung. Eine zunächst vermutete Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wurde untersucht, konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 5.5.: Herstellerangaben zu Fahrleistung/-widerständen

	Größe	Technische Daten
Nennleistung	P_N	210kW
Fahrzeugmasse	m	2090 kg
Luftwiderstandsbeiwert	c_w	0,28
Stirnfläche	A	2,0 m ²
Radwiderstandsbeiwert	f_R	0,015

In Autobahnsituationen ist zu sehen, dass die Größe des Kennwerts bei hohen Geschwindigkeiten sich höchstens der theoretischen Beschleunigung annähert. Die wenigen größeren Werte resultieren aus Beschleunigungen bei niedrigeren Geschwindigkeiten, welche durch die Phasenverschiebung erst bei den später gefahrenen höchsten Geschwindigkeiten zu Tage treten. Eine Korrelationsanalyse zur Bestimmung der Geschwindigkeitsabhängigkeit in Autobahnsituationen wurde zwar durchgeführt, der Erklärungsbeitrag liegt jedoch, wie anhand des Diagramms bereits zu sehen, unter 5%.

Abschließend ist zu bemerken, dass die obige Hypothese über die wechselseitigen Abhängigkeiten nur zum Teil falsifiziert ist. Es besteht ein knapp über 30% liegender Erklärungsbeitrag zwischen den beiden Kennwerten maximale Beschleunigung und maximale Verzögerung. Dieser ist jedoch, aufgrund der geringen Varianz des Beschleunigungskennwerts auf Autobahnen, nur in Landstraßensituationen nachweisbar.

5.2.4 Einfluss der Geschwindigkeit

Als weiteres Kriterium zur Beschreibung der Dynamik der Fahrt wird der Kennwert „Tempolimitnutzung“ herangezogen und dessen Einfluss auf das Verhalten in Folgefahrt untersucht. Als wiederum zu widerlegende Hypothese wird aufgestellt:

H_0 : „Die Abstandswahl ist unabhängig von der Tempolimitausnutzung in der Fahrt-historie.“

Bild 5.22. zeigt zunächst den Einfluss der intervallskalierten Tempolimitnutzung über alle Folgefahrtsituationen auf das Abstandsverhalten.

Es ist zu sehen, dass in den oberen beiden Tempolimitnutzungsklassen, die einer Überschreitung des Tempolimits von mindestens 10% entsprechen, immerhin 22,6% aller Folgefahrtsituationen stattfinden ((172+48)/974 Situationen).

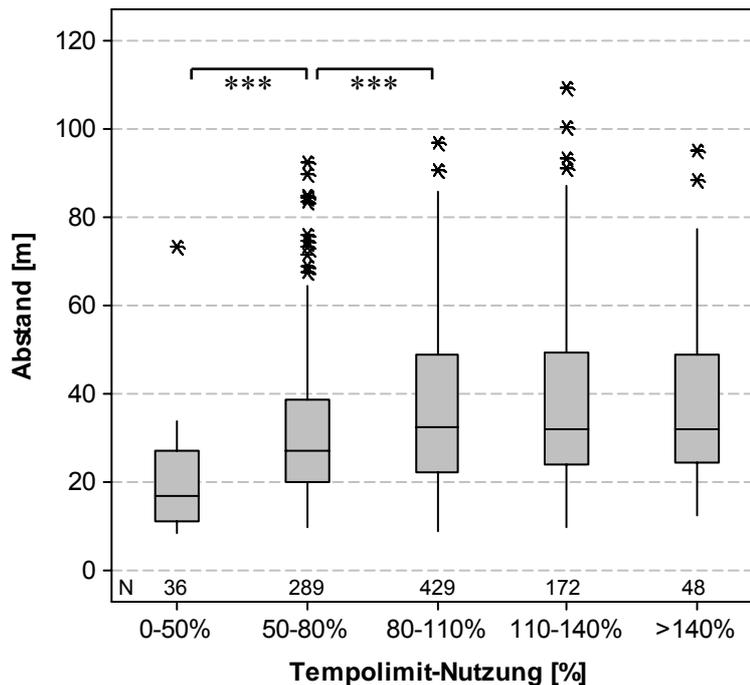


Bild 5.22.: Einfluss des Kennwerts „Tempolimitnutzung“ auf das Abstandsverhalten

Höchstsignifikant sind unterschiedliche Abstandswerte nur im Bereich niedriger Tempolimitnutzungen nachzuweisen, dies allerdings mit entgegen gesetzter Tendenz zur zunächst vermuteten Abhängigkeit. Möglicherweise ist dies im Niedriggeschwindigkeitsbereich auf Kolonnenverkehr zurückzuführen, was im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurde.

Mit zum Teil deutlicher Überschreitung des vorgeschriebenen Tempolimits halten Fahrer in etwa konstante Abstände zum voraus Fahrenen ein. Die Analyse der Abstandswahl getrennt nach der Straßenklasse führt zu dem Ergebnis, dass das für die Gesamtheit der Situationen vorgefundene Verhalten ebenso auf Autobahnen als auch auf Landstraßen gilt (Abstand Landstraße [m]: 17,7 – 29,3 – 32,1 – 28,5 – 41,6; Abstand BAB [m]: 32,4 – 39,7 – 46,8 – 42,2 – 37,6 Meter).

Hinsichtlich der Zeitlückenwahl werden allerdings nur scheinbar signifikante Unterschiede in Abhängigkeit von der Tempolimitnutzung gefunden. Die Untersuchung der Zeitlücken getrennt nach Straßenklassen zeigt über der Tempolimitnutzung eine stark gegenläufige Tendenz (Zeitlücke Landstraße [s]: 1,23 – 1,53 – 1,57 – 1,37 – 1,63; Zeitlücke BAB [s]: 1,88 – 1,49 – 1,54 – 1,23 – 1,06).

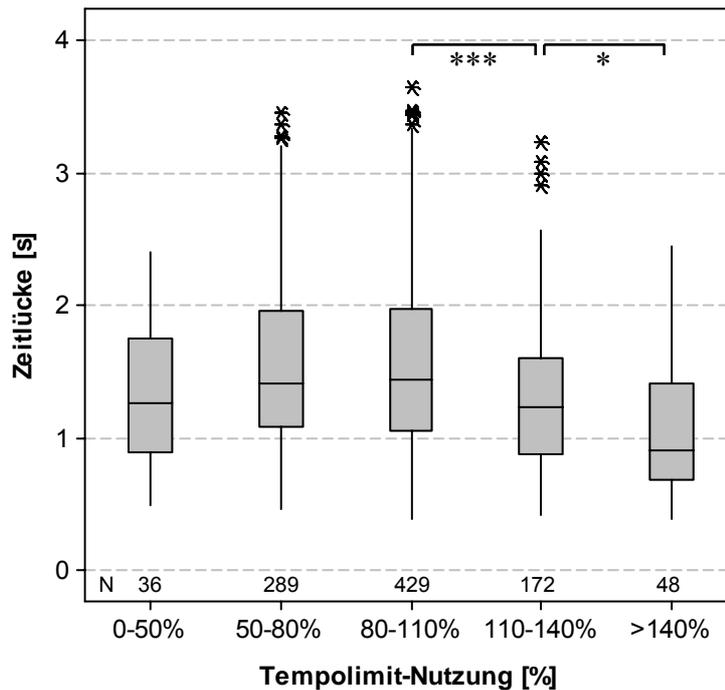


Bild 5.23.: Einfluss des Kennwerts „Tempolimitnutzung“ auf das Zeitlückenverhalten

Die scheinbaren Unterschiede in den höheren Klassen hängen angesichts der Gegenläufigkeit der zugrunde liegenden Zeitlücken rein von der jeweiligen Situationsanzahl ab, so dass einer Schlussfolgerung hinsichtlich einer Falsifikation aus diesem Ergebnis nicht vertraut werden kann.

Abschließend ist festzuhalten, dass die mittlere, prozentuale Tempolimitnutzung im Bereich der drei relevanten Klassen zwischen 50 und 140% keinen wesentlichen Beitrag zur Aufklärung der Abstands- und Zeitlückenvarianzen bietet. Die gefundenen Abhängigkeiten bei unteren Nutzungsklassen beruhen möglicherweise auf weiteren Effekten, die hier nicht untersucht wurden.

5.2.5 Einfluss der Anzahl eigener Überholvorgänge

Zusätzlich zu den bisher berücksichtigten Kennwerten auf Basis der gemessenen fahrdynamischen Daten Beschleunigung und Geschwindigkeit, soll nun ein weiterer untersucht werden, der mit der Dynamik der Fahrt in Zusammenhang steht.

Durch die Videoanalyse wurden die Überholvorgänge der Versuchspersonen aufgezeichnet und, wie im Kapitel 4.2.1.3 definiert, im Kennwert „Anzahl an Überholungen“ in den zurück liegenden 300 Sekunden aufsummiert.

Im Folgenden soll die Hypothese:

H_0 : „Die Abstandswahl ist unabhängig von der Häufigkeit des Überholens.“

widerlegt werden.

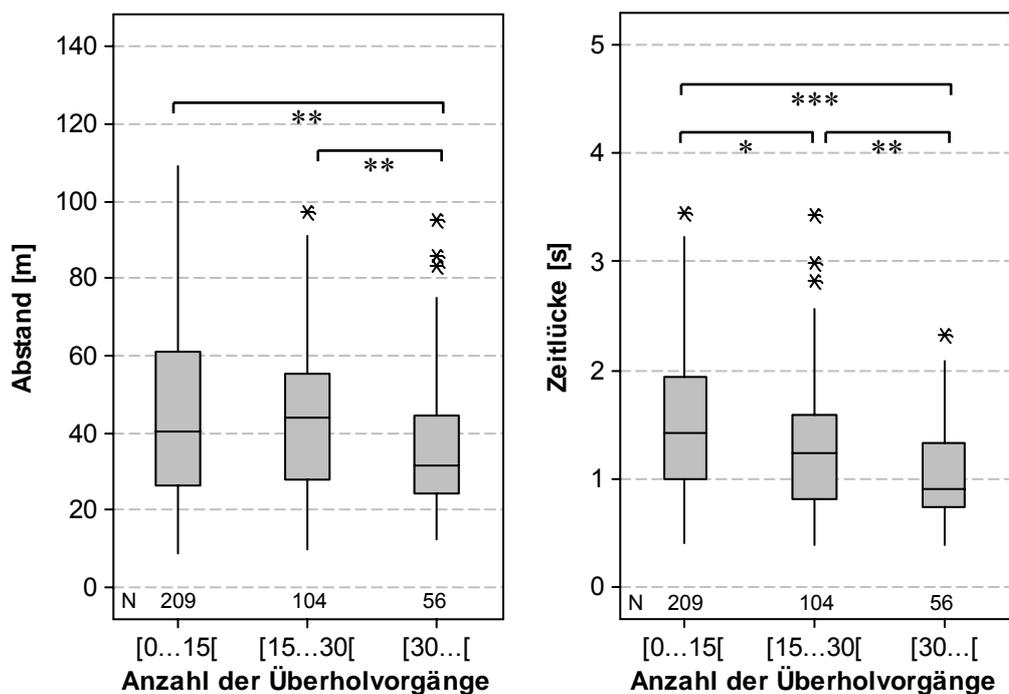


Bild 5.24.: Einfluss der Anzahl an Überholvorgängen (Autobahn)

Die Untersuchung des Folgeverhaltens in Abhängigkeit von der Anzahl an Überholvorgängen auf Landstraßen ist nicht sinnvoll. Insgesamt fanden im Verlauf der 24 Versuchsfahrten 185 Überholvorgänge auf Landstraßen statt. Durchschnittlich entspricht dies bei einer mittleren Fahrtdauer auf dieser Straßenklasse von rund 2500 Sekunden etwa einem Überholvorgang pro 325 Sekunden. Eine Auswertung nach unterschiedlicher Anzahl in den letzten 300 Sekunden liefert nur geringe Besetzungen der beiden

ersten Klassen, die eine statistische Bewertung nicht zulassen. Damit stellen eigene Überholungen auf Landstraßen Singularitäten dar, deren Auftreten weniger mit dynamischer Fahrweise in Zusammenhang stehen als vielmehr mit zufälligen, langsam fahrenden Führungsfahrzeugen.

Auf Autobahnen hingegen sind im Verlauf der letzten 300 Sekunden bis zu 70 Überholvorgänge zu verzeichnen. **Bild 5.24.** zeigt die Zeitlücken und Abstände, die die Fahrer in anschließenden Folgefahrten nach Überholungen gewählt haben.

Es wird deutlich, dass die Fahrer mit zunehmender Anzahl an überholten Fahrzeugen in den nächsten Folgefahrten dichter auffahren. Dieser Zusammenhang ist zwischen den Klassen 2 (15-29 Überholte) und 3 (über 30 Überholte) hochsignifikant. Zwischen Klasse 1 (bis 14 Überholte) und 2 besteht dieser Zusammenhang bezüglich des absoluten Abstandes nicht, werden allerdings die gefahrenen Zeitlücken beachtet, die bereits hier eine signifikante Reduktion aufweisen, so wird klar, dass die Folgefahrten in Klasse 2 bei höheren Geschwindigkeiten stattfinden. Gemäß Regressionsanalyse aus Kapitel 5.1.1 würde man erwarten, dass die Fahrer den Abstand erhöhen (vgl. *Gl. 5.2.*, S. 48), was sie an dieser Stelle jedoch unterlassen.

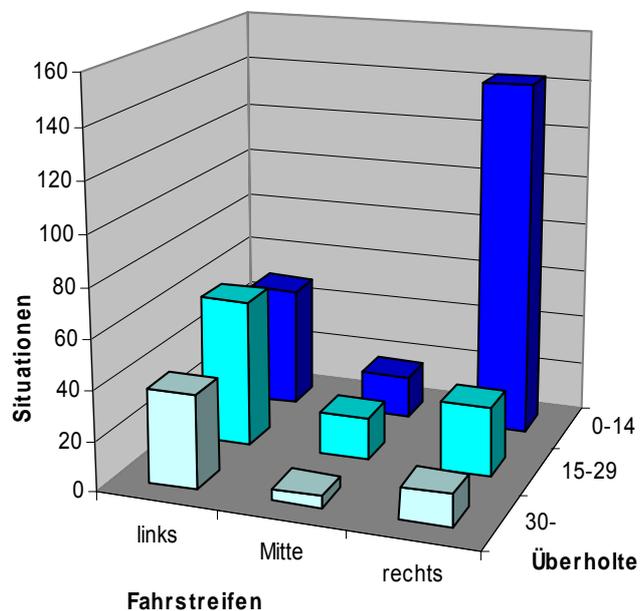


Bild 5.25.: Überholvorgänge nach Fahrstreifen

Bei tieferer Analyse der Geschwindigkeit fällt auf, dass die Fahrer in Klasse 1 mit durchschnittlich 105,3km/h am langsamsten fahren. In Klasse 2 und 3 werden mit 124,6

und 123,5km/h nahezu gleiche Geschwindigkeiten erreicht. **Bild 5.25.** zeigt die Ursache hierfür. Untersucht man die Folgefahrten getrennt nach Fahrstreifen, so ist zu sehen, dass in Klasse 1 mit wenigen Überholungen die meisten Situationen rechts stattfinden. Darüber hinaus findet sich dort auch eine größere Anzahl an Situationen bei denen in den letzten 300 Sekunden nicht überholt wurde. Das heißt, dass in dieser Gruppe mit 140 Situationen auch all diejenigen zu finden sind, die auf dem rechten Streifen ohne Überholabsichten im Verkehr mit geflossen sind. Auf dem linken Fahrstreifen finden sich, sieht man von denjenigen ab, die rechts nur mitfließen, die meisten Folgefahrtsituationen. Dies wundert nicht, da die Fahrer dort nicht weiter überholen können. In der Mitte finden absolut die wenigsten Folgefahrten statt. Offensichtlich wird dieser Fahrstreifen insbesondere nur kurzzeitig genutzt, um anschließend rechts oder links weiter zu fahren.

Diese Kurzfristigkeit findet sich auch in der Untersuchung der Situationsdauer in Abhängigkeit vom Fahrstreifen wieder, deren Ergebnis in **Bild 5.26.** dargestellt ist.

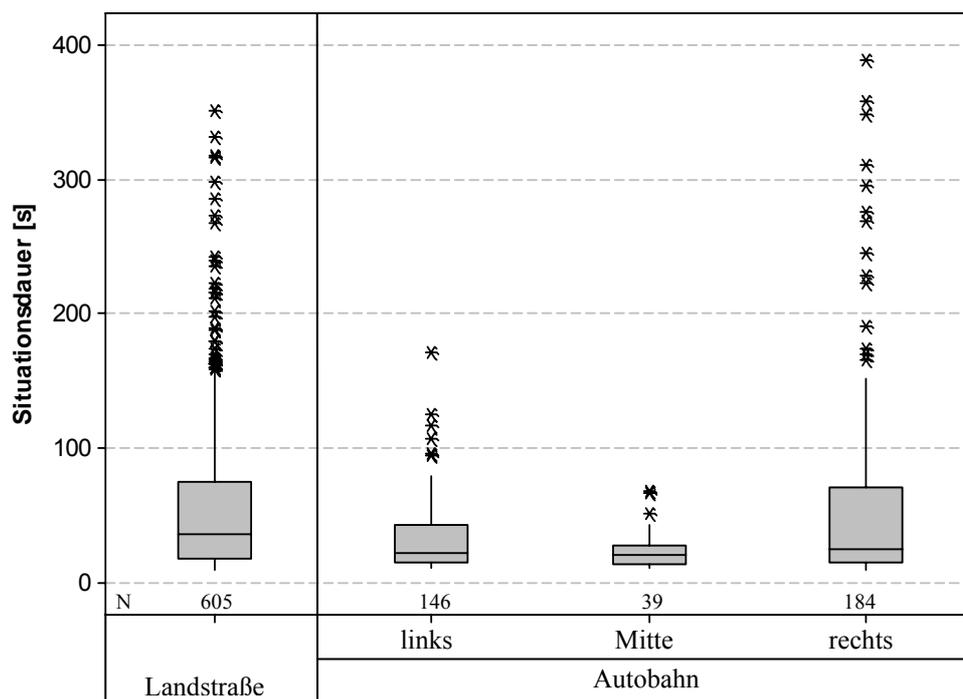


Bild 5.26.: Situationsdauer in Abhängigkeit vom Ort

Hier ist zu sehen, dass auf dem mittleren Fahrstreifen mit 23,9s die kürzesten Zeiten in Folgefahrt verbracht werden. Darüber hinaus zeigt die geringe Standardabweichung von 13,6 Sekunden, dass sich die Fahrer dort im Vergleich zu den anderen Orten sehr homo-

gen verhalten. Am längsten dauern Folgefahrtsituationen auf dem rechten Fahrstreifen (Mittelwert 59,9s, Stdabw. 72,8s), was, wie bereits gesehen, überwiegend von den „Mitfließenden“ herrührt. Links verbringen Fahrer durchschnittlich 31,9s in Folgefahrt (Stdabw. 25,5s). Auf Landstraßen, auf denen Fahrer selten die Möglichkeit zum Überholen haben, werden etwa gleiche Folgezeiten (MW 55,5s, Stdabw. 54,3s) erzielt wie auf rechten Autobahnstreifen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die aufgestellte Hypothese auf Autobahnen klar widerlegt werden kann. Das heißt es darf mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass nach Fahrtabschnitten mit einer hohen Anzahl an Überholvorgängen innerhalb der letzten 300 Sekunden in anschließenden Folgefahrten umso dichter aufgefahren wird. Dies äußert sich sowohl in der Zeitlücke als auch im absoluten Abstand.

Bezüglich Landstraßensituationen führt der gewählte Ansatz zu keiner validen Aussage. Es wurde gefunden, dass eigene Überholungen dort nur gelegentlich auftreten.

5.2.6 „Vorbeischauchen“ in Folgefahrt

Nach der Untersuchung des tatsächlichen Überholverhaltens, ist des Weiteren die Vorbereitung von Überholvorgängen zu untersuchen. Im Fokus der Analyse stehen diejenigen Situationen, in denen der Fahrer in Folgefahrt am voraus Fahrenen vorbei schaut, um potenzielle Überholmöglichkeiten zu erkunden.

Als zu falsifizierende Hypothese wird aufgestellt:

H_0 : „Die Abstandwahl ist unabhängig davon, ob am Führungsfahrzeug zur Vorbereitung eines Überholmanövers vorbei geschaut wird.“

In welchen Situationen der Fahrer am Führungsfahrzeug vorbeischaute, konnte anhand der Videoaufzeichnungen ermittelt werden. Diese Analyse kann nur auf Landstraßen durchgeführt werden. Auf dem linken Fahrstreifen von Autobahnen wurde zwar ebenfalls vereinzelt beobachtet, dass Fahrer am „Vordermann“

vorbei sahen, da dies dort aber nicht zur Erkundung von Überholmöglichkeiten dienen konnte, wurden diese Situationen nicht mit in die Auswertung einbezogen. Auf dem rechten und mittleren Autobahnfahrstreifen müssen sich die Fahrer zur Vorbereitung

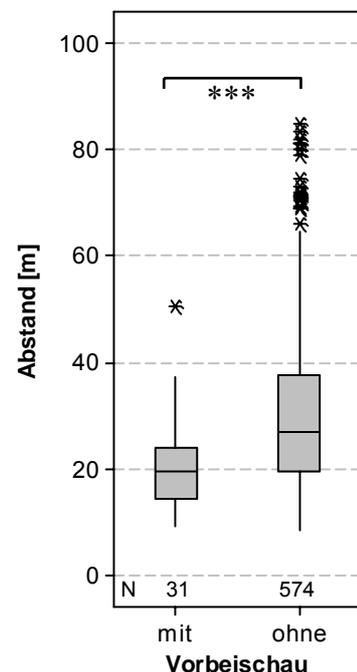


Bild 5.27.: Abstand bei Vorbeischauchen in Folgefahrt

von Überholmanövern eher nach hinten orientieren, um beim Fahrstreifenwechsel zur Einleitung des Manövers den nachfolgenden Verkehr nicht zu gefährden. Dies wurde jedoch nicht untersucht.

Bild 5.27. zeigt den Vergleich des Abstandsverhaltens in Folgefahrt zwischen den Fällen mit und ohne vorbei schauen. Es ist zu sehen, dass die Fahrer in Situationen, in denen sie vorbei schauen, einen höchstsignifikant kürzeren Abstand wählen. Die Mittelwerte differieren zwischen 19,7 und 35,6 Metern. Dabei nehmen in den Situationen mit Vorbeischau Mittelwert und Median beinahe exakt den gleichen Wert an. Ausreißer in Richtung großer Abstandswerte finden praktisch nicht statt, was sich auch in der deutlich niedrigeren Standardabweichung ausdrückt ($\sigma_{\text{ohneVS}} = 18,3 \rightarrow \sigma_{\text{mitVS}} = 8,0\text{m}$).

Bild 5.28. zeigt hinsichtlich der gewählten Zeitlücken vergleichbares Verhalten. Auch hier wird ein höchstsignifikanter Zusammenhang gefunden, und auch die Lagen der Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen verhalten sich gleich ($\tau_{\text{ohneVS}} = 1,49\text{s}$, $\sigma_{\text{ohneVS}} = 0,63\text{s} \rightarrow \tau_{\text{mitVS}} = 1,00\text{s}$, $\sigma_{\text{mitVS}} = 0,38$).

Die von den Fahrern in diesen verschiedenen Situationen gefahrenen Geschwindigkeiten unterscheiden sich und liegen bei ($v_{\text{ohneVS}} = 85,9\text{km/h} \rightarrow v_{\text{mitVS}} = 71,0\text{km/h}$).

Abschließend ist festzustellen, dass die zur Vorbeischau aufgestellte Hypothese auf einem Signifikanzniveau kleiner 0,1% abgelehnt werden kann. Auch hier bedeutet dies, dass dem Vorbeischaun am voraus Fahrenen zur Erkundung potenzieller Überholmöglichkeiten mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Einfluss auf das Folgeverhalten hinsichtlich sowohl der Abstands- als auch der Zeitlückenwahl zugeschrieben werden kann und zwar Richtung einer Verkürzung des Abstandes und der Zeitlücke in den Fällen, in denen am voraus Fahrenen vorbeigeschaut wurde.

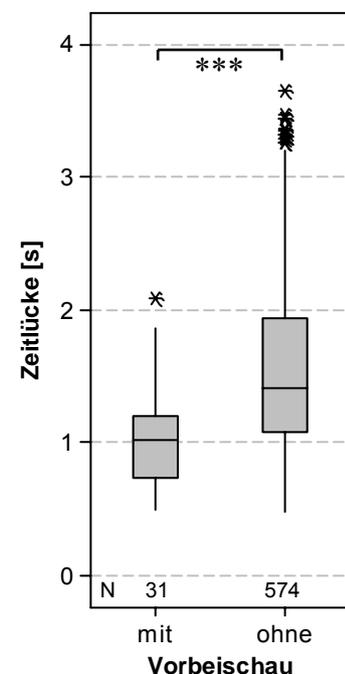


Bild 5.28.: Zeitlücke bei Vorbeischau in Folgefahrt

5.2.7 Zwischenfazit

In der Untersuchung der Einflüsse der Dynamik der Fahrt auf das Folgeverhalten konnten die folgenden, zum Teil stark ausgeprägten Abhängigkeiten nachgewiesen werden.

So wurde gefunden, dass der Kennwert „maximale Verzögerung“, der eine Aussage über die vom Fahrer in den letzten 120 Sekunden der Fahrthistorie gefahrenen Maximal-

verzögerungen trifft, einen erheblichen Einfluss auf das anschließende Folgeverhalten hat. Die Fahrer stellten auf einem Signifikanzniveau von unter 0,1% mit zunehmendem Kennwert kürzere Zeitlücken und kürzere Abstände ein.

Bezüglich des in analoger Weise berechneten Kennwerts „maximale Beschleunigung“ zeigten sich zwar signifikante Unterschiede, die sich aber nicht als kausale Zusammenhänge ansehen lassen. Es wurden zufällige Anhäufungen von vielen kürzesten Abständen in Landstraßensituationen sowie im Gegenpol größter Abstände in Autobahnsituationen ermittelt, die in Kombination eine scharfe Abhängigkeit vom Kennwert vortäuschten. Getrennt nach Straßenklasse ließ sich die Hypothese von der Gleichheit der Mittelwerte über dem Kennwert jedoch in keinem Fall falsifizieren, so dass in Summe keine Abhängigkeit des Folgeverhaltens vom errechneten Kennwert belegt werden konnte.

Zwischen den beiden Kennwertgrößen für Beschleunigung und Verzögerung wurde durch Regression in Landstraßensituationen ein leichter Zusammenhang mit einem Erklärungsbeitrag von knapp über 30% gefunden. Auf Autobahnen besteht diese Abhängigkeit, bedingt durch das geringe Beschleunigungsvermögen bei hohen Tempi, nicht.

Beim Kennwert „Tempolimitnutzung“ trat eine zufällige Polbildung im Bereich relevanter Tempolimitnutzungen auf. Die durchaus gefundenen scharfen Abhängigkeiten im unteren Kennwertbereich, haben für die Praxis allerdings keine Relevanz.

Deutlichen Einfluss auf das Folgeverhalten zeigt die Anzahl der eigenen Überholvorgänge in den letzten 300 Sekunden der Fahrthistorie auf Autobahnen. Dort wählten die Fahrer signifikant kleinere Zeitlücken und Abstände mit zunehmender Überholanzahl. Auf Landstraßen konnte mangels ausreichender Zahl an Überholvorgängen keine Aussage getroffen werden.

Eine ebenso deutliche Abhängigkeit des Folgeverhaltens konnte beim „Vorbeischauen“ am Führungsfahrzeug auf Landstraßen nachgewiesen werden. Blickten die Fahrer in Folgesituationen am voraus Fahren vorbei, um zum Beispiel Überholmöglichkeiten zu prüfen, so hielten sie höchstsignifikant kürzere Abstände und Zeitlücken ein.

5.3 Einfluss der Witterung

Nach der Untersuchung der Grundgrößen des Folgeverhaltens sowie den Größen, die eine Aussage zur Dynamik der Fahrt treffen, wird hier nun der Einfluss unterschiedlicher Witterungsbedingungen untersucht. Zugrunde liegt die Einteilung der vorliegenden Bedingungen in Witterungsklassen nach **Tabelle 4.4.**

5.3.1 Folgeverhalten

Im ersten Schritt liegt der Fokus auf der Analyse des Einflusses auf das Abstands- und Zeitlückenverhalten der Fahrer. Die Hypothese lautet hier:

H_0 : „Der Folgeabstand ist unabhängig von den drei Zuständen Trockenheit, Nässe und Sichtbehinderung.“

Bild 5.29. zeigt die von den Versuchspersonen gefahrenen Abstände in den Witterungsklassen „trocken“, „nass“ und „Sichtbehinderung“ getrennt nach Straßenklassen.

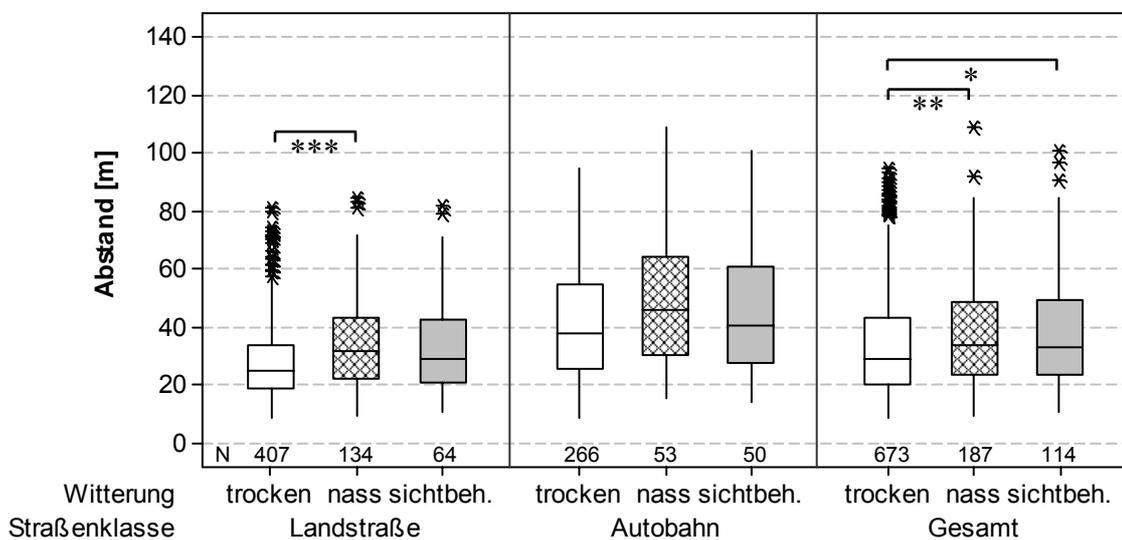


Bild 5.29.: Einfluss der Witterung auf den Abstand

Auf Landstraßen erhöhten die Fahrer unter vorherrschender Nässe den Abstand zum voraus Fahrenen höchstsignifikant im Vergleich zur Trockenheit. Bei zusätzlicher Sichtbehinderung wurden die Abstände jedoch nicht weiter erhöht, sondern im Mittel sogar eher verkürzt, so dass selbst zwischen Trockenheit und Sichtbehinderung kein signifikanter Unterschied mehr nachweisbar ist. Dabei sind natürlich die unterschiedlichen Situationsanzahlen zu berücksichtigen, die im Fall der ungünstigsten Witterungskategorie die Schärfe der Aussage verwischen. In **Tabelle 5.6.** sind die Mittelwerte der einzelnen Klassen noch einmal zusammengefasst.

Wie bereits in Kapitel 5.1.3 gesehen, werden auf Autobahnen bei deutlich höheren Geschwindigkeiten auch größere Abstände gefahren. Dabei erhöht sich die Varianz des Abstandes im Vergleich zur Landstraße erheblich. Zwar verschieben sich Mittelwerte und Mediane mit zunehmend schlechter Witterung analog zum Verhalten auf Landstra-

ßen, signifikante Änderungen können angesichts der Varianz und der geringeren Stichprobenumfänge für Autobahnen jedoch nicht nachgewiesen werden.

Über alle Situationen zeigt sich ein hochsignifikanter Anstieg der Abstandswerte zwischen Trockenheit und Nässe. Aber auch dann werden mit Sichtbehinderung die Abstände nicht weiter vergrößert, sondern liegen auf gleichem Niveau wie bei reiner Nässe. Der deutliche Unterschied im Vergleich zur Trockenheit bleibt dabei allerdings bestehen. Das Signifikanzniveau liegt dann aber nur noch bei über 1%, was auf den reduzierten Stichprobenumfang bei Sichtbehinderung zurückzuführen ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Abstände zwischen Autobahn- und Landstraßensituationen wird bei der Betrachtung der Gesamtheit auf Scheinabhängigkeiten geprüft.

Bei gleichen relativen Situationshäufigkeiten in den zu untersuchenden

Witterungsklassen wirken sich unterschiedliche Abstände in den Straßenklassen bei Zusammenfassung der Situationen beider Straßen zwar Varianz erhöhend aus, die Kernaussage der statistischen Prüfung über die Unterschiedlichkeit der Lagen der Mittelwerte bleibt jedoch erhalten. Unterschiedliche relative Häufigkeiten können dazu führen, dass überrepräsentierte, zum Grundverhalten gegensätzliche Teileffekte der einen Straßenklasse in Addition zu einer Verschiebung der relativen Lagen der Mittelwerte führen und das Ergebnis des statistischen Tests zu nicht korrekten Schlussfolgerungen führt. Im vorliegenden Fall ist zu einer solchen Polbildung allerdings kein Anlass gegeben. Die Klassen sind mit Ausnahme der Sichtbehinderung relativ etwa gleich stark besetzt, und darüber hinaus zeigen die Änderungen der Mittelwerte über den Witterungsklassen auf beiden Straßenklassen ebenfalls gleiche Tendenz.

Tabelle 5.6.: Abstand/Zeitlücke nach Witterung

Witterung		trocken	nass	Sicht
Autobahn	d [m]	41,61	47,43	45,52
	Signifikanz	-		
			-	
		-		
	τ [s]	1,30	1,69	1,48
	Signifikanz	***		
		-		
*				
N	266	53	50	
Landstraße	d [m]	28,22	34,31	32,22
	Signifikanz	***		
			-	
		-		
	τ [s]	1,44	1,75	1,53
	Signifikanz	***		
		*		
-				
N	407	134	64	
Gesamt	d [m]	33,52	38,02	38,05
	Signifikanz	**		
			-	
		*		
	τ [s]	1,39	1,73	1,51
	Signifikanz	***		
		**		
*				
N	673	187	114	

Analysiert man die Zeitlücken in **Bild 5.30.**, so ist zu sehen, dass sowohl innerhalb der Straßenklassen als auch in der Gesamtdarstellung die Zeitlücken beim Wechsel von der trockenen zur nassen Straße deutlich und höchstsignifikant erhöht werden. Über alle Gruppen wird bei zusätzlicher Sichtbehinderung die Zeitlücke wieder reduziert, was nur auf der Autobahn aufgrund geringeren Stichprobenumfangs nicht signifikant nachgewiesen werden kann. Die statistische Überprüfung der Gesamtheit führt auf Basis obiger Diskussion über die Scheinabhängigkeiten hier zu keinen fehlerhaften Schlussfolgerungen, da die Änderungen der Zeitlücken in beiden Straßenarten bei unterschiedlichen Witterungen hier nicht nur tendenziell, sondern sogar der absoluten Höhe nach innerhalb des Interquartilbereichs übereinstimmen.

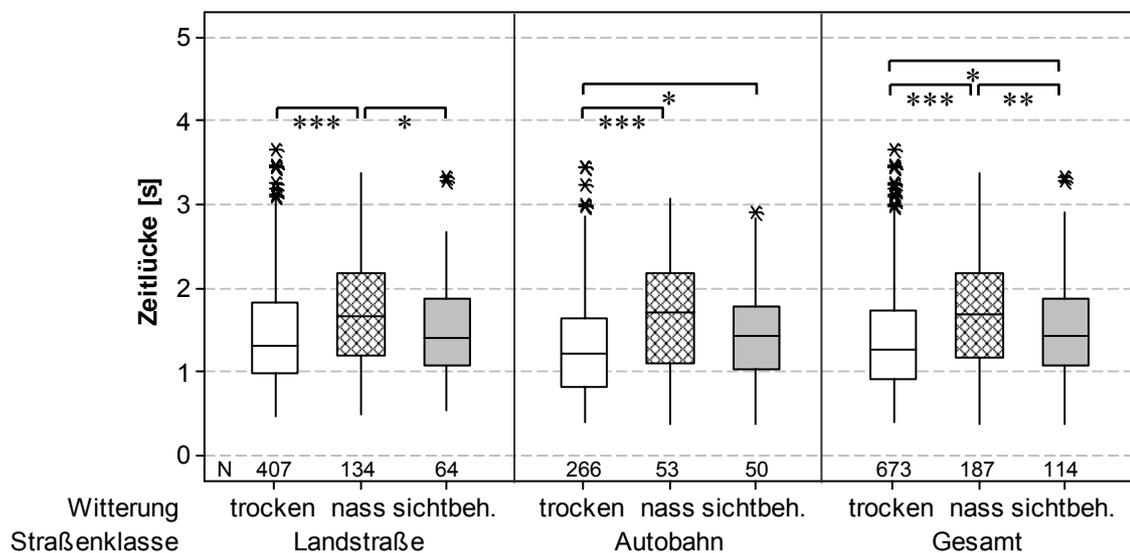


Bild 5.30.: Einfluss der Witterung auf die Zeitlücke

Weiterhin ist festzustellen, dass die Reduktion der Zeitlücke auf Landstraßen zwischen Nässe und Sichtbehinderung soweit geht, dass im Vergleich zur Trockenheit keine statistisch gesicherten Unterschiede mehr bestehen. Daraus folgt, dass Fahrer auf der Landstraße offensichtlich versuchen, sich bei sehr schlechten Witterungsbedingungen am voraus Fahren zu orientieren. Auf Autobahnen liegen die Zeitlücken bei Sichtbehinderung immer noch signifikant über denen bei Trockenheit.

In der Gesamtheit werden zwischen allen Witterungsklassen signifikante und zum Teil höchstsignifikante Unterschiede bezüglich der Zeitlückenwahl festgestellt.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die aufgestellte Hypothese über die Unabhängigkeit des Abstandsverhaltens von den Witterungsbedingungen mit einer sehr geringen Irrtumswahrscheinlichkeit abgelehnt werden kann.

5.3.2 Geschwindigkeitswahl

Im nächsten Schritt sollen nun die Auswirkungen der Witterungsbedingungen auf das Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer untersucht werden. Dabei ist sowohl die Geschwindigkeit in Folgefahrt als auch diejenige bei freier Fahrt zu berücksichtigen.

Als Hypothese wird zunächst aufgestellt:

H_0 : „Die Wahl der Geschwindigkeit ist unabhängig von den drei Zuständen Trockenheit, Nässe und Sichtbehinderung.“

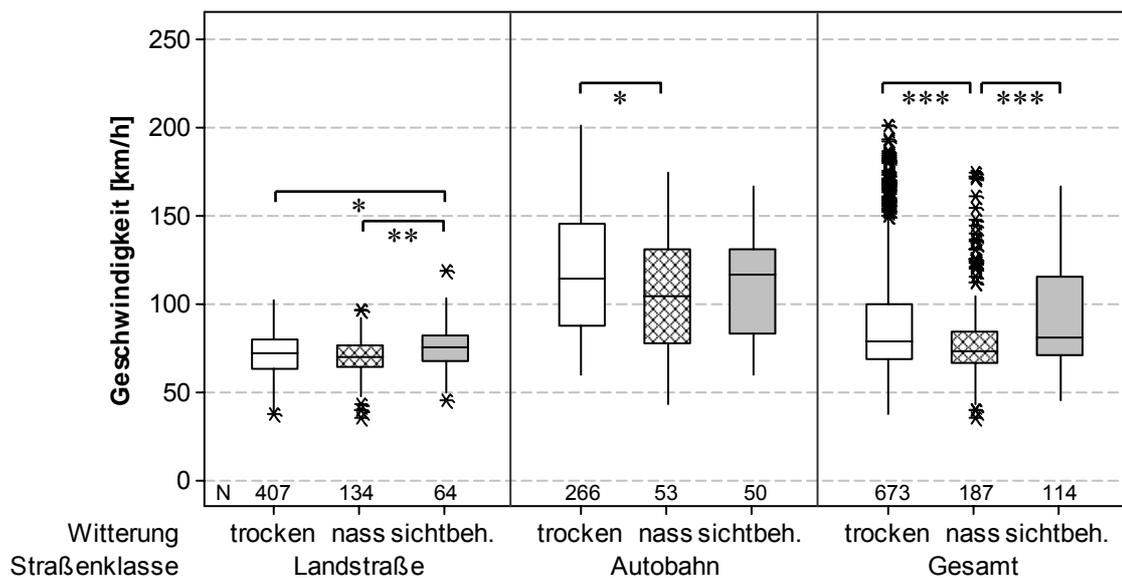


Bild 5.31.: Einfluss der Witterung auf die Folgegeschwindigkeit

Bild 5.31. zeigt zunächst die von den Fahrern gewählten Geschwindigkeiten in Folgefahrtsituationen. Es ist festzustellen, dass auch in Landstraßensituationen bei Sichtbehinderung, das heißt bei ungünstigsten Witterungsbedingungen, im Durchschnitt am schnellsten gefahren wird. Diese Erhöhung ist sowohl gegenüber Trockenheit als auch

gegenüber Nässe absolut gering (ca. 5 km/h), aber signifikant. Die exakten Mittelwerte können **Tabelle 5.7.** entnommen werden.

Auf Autobahnen werden die höchsten durchschnittlichen Geschwindigkeiten erwartungskonform bei Trockenheit gefahren. Allerdings kann eine signifikante Reduktion der Geschwindigkeit in Folgefahrten nur bei Nässe nachgewiesen werden. Die gefahrenen Geschwindigkeiten bei Sichtbehinderung liegen im Mittel zwischen denen der beiden anderen Witterungsklassen, so dass statistisch zu beiden keine gesicherten Unterschiede bestehen. Lediglich Ausreißer nach oben unterbleiben bei Sichtbehinderung, das heißt die höchsten dort gefundenen Geschwindigkeiten sinken, und die Varianz wird kleiner.

Weiterhin ist festzustellen, dass die Varianzen in Landstraßensituationen deutlich kleiner sind als auf der Autobahn. Dies liegt an den durch Tempolimit oder Streckenführung nach oben begrenzten maximalen Geschwindigkeiten auf Landstraßen bei gleichzeitigen Freiheiten für die Fahrer auf Autobahnen.

Analysiert man die Geschwindigkeiten auf beiden Straßenklassen, so sind zwischen jeweils benachbarten Witterungsklassen höchstsignifikante Unterschiede nachzuweisen. Auch hier ist der bereits auf Autobahnen zu verzeichnende Effekt zu sehen, dass kein signifikanter Unterschied mehr zwischen Trockenheit und Sichtbehinderung besteht.

Werden die Geschwindigkeiten in freier Fahrt aus **Bild 5.32.** untersucht, so wird auf Landstraßen ein analoges Verhalten wie in Folgefahrtsituationen vorgefunden. Auch hier wählten die Fahrer entgegen der Erwartung bei Sichtbehinderung die größten und bei Nässe die kleinsten Geschwindigkeiten. Dieser Zusammenhang ist hochsignifikant.

Tabelle 5.7.: Geschwindigkeit nach Witterung

Witterung		trocken	nass	Sicht
Autobahn	v_{FF} [km/h]	118,3	106,7	111,5
	Signifikanz	*		
				-
		-		
	v_{Frei} [km/h]	145,9	141,0	142,9
Signifikanz	-			
			-	
	-			
N				
Landstraße	v_{FF} [km/h]	70,6	70,0	75,0
	Signifikanz	-		
				**
		*		
	v_{Frei} [km/h]	72,1	69,5	82,7
Signifikanz	-			
			**	
	*			
N				
Gesamt	v_{FF} [km/h]	89,5	80,4	91,1
	Signifikanz	**		
				**
		-		
	v_{Frei} [km/h]	111,7	97,8	117,0
Signifikanz	**			
			**	
	-			
N	427	111	72	

Im Vergleich zur Trockenheit wird ebenfalls ein statistisch gesicherter Unterschied bei Sichtbehinderung gefunden.

Auf Autobahnen liegt ein Einfluss der Witterungsbedingungen nur in sofern vor, als die Fahrer, wie schon in Folgefahrt, mit zunehmend ungünstiger Witterung die höchsten Geschwindigkeiten reduzieren.

In Kombination beider Straßenklassen werden in ihrer Tendenz die gleichen hochsignifikanten Unterschiede gefunden wie in Folgefahrt, wenn auch auf höherem, absoluten Geschwindigkeitsniveau.

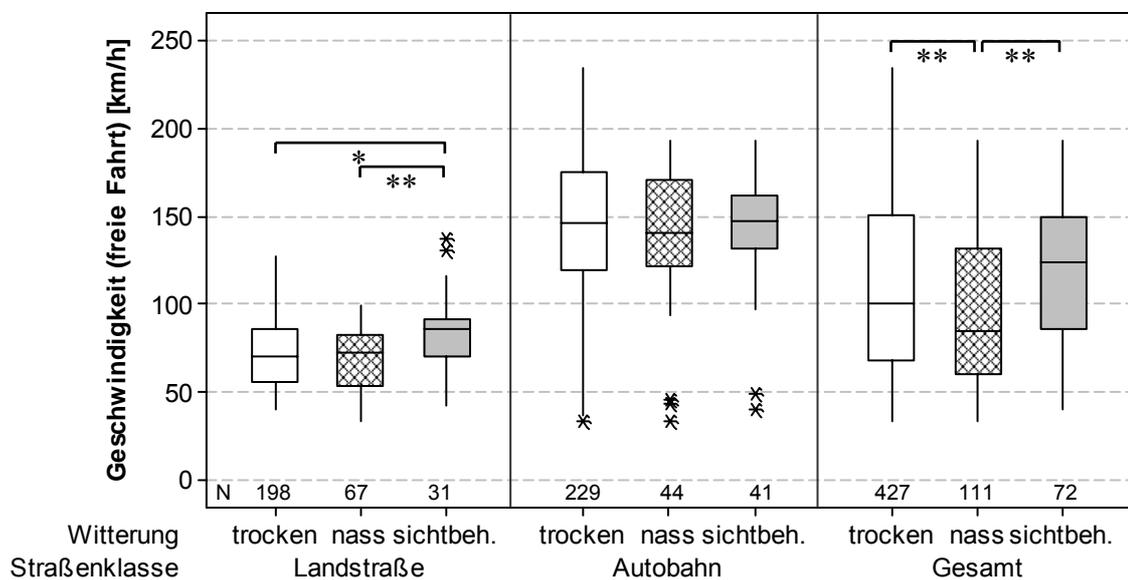


Bild 5.32.: Einfluss der Witterung auf die Geschwindigkeit in freier Fahrt

Es wird damit gezeigt, dass die Witterungsbedingungen einen teilweise starken Einfluss auf die Wahl der Geschwindigkeit haben. Dies gilt sowohl für Folgefahrt als auch für freie Fahrten. Damit ist die Hypothese, es bestünden keine Einflüsse, widerlegt, obgleich hinzuzufügen ist, dass vor der Untersuchung bezüglich der Geschwindigkeitswahl bei Sichtbehinderung ein entgegen gesetzter Einfluss erwartet wurde. In nahezu allen Gruppen fahren die Fahrer im Mittel bei Sichtbehinderung die höchsten und bei Nässe die niedrigsten Geschwindigkeiten.

5.3.3 Verzögerungs- und Beschleunigungsverhalten

Zur Untersuchung des Einflusses der Witterung auf die Kennwerte maximale Verzögerung und maximale Beschleunigung wurden die folgenden beiden Hypothesen aufgestellt:

H_0 : „Die Höhe der maximalen Verzögerungen ist unabhängig von den drei Zuständen Trockenheit, Nässe und Sichtbehinderung.“

H_0 : „Die Höhe der maximalen Beschleunigungen ist unabhängig von den drei Zuständen Trockenheit, Nässe und Sichtbehinderung.“

Allerdings konnten diese Hypothesen weder für Landstraßen- noch für Autobahnsituationen mit hinreichender Signifikanz ($\alpha=5\%$) falsifiziert werden. Es kann deshalb keine Aussage darüber getroffen werden, ob diese Abhängigkeiten tatsächlich bestehen oder nicht.

5.3.4 Zwischenfazit

Bezüglich des Einflusses von Witterungsbedingungen auf das Folgeverhalten von Fahrern konnte gezeigt werden, dass die Fahrer bei Trockenheit sowohl die kleinsten Abstände als auch die kleinsten Zeitlücken fahren. Auf nassen Fahrbahnen hingegen werden die größten Werte gefunden. Bei eintretender Sichtbehinderung fahren die Fahrer wiederum dichter auf.

Auch auf die Wahl der Geschwindigkeit haben Witterungsbedingungen Einfluss. Trotz zum Teil statistisch gut gesicherter Abhängigkeiten liegen die Geschwindigkeitsänderungen durch unterschiedliche Witterungsbedingungen aber durchgehend im Bereich weniger Prozentpunkte und zeigen ein in der Tendenz mit der Abstands- und Zeitlückenwahl identisches Verhalten.

Einflüsse der Witterung auf das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten konnten nicht gefunden werden.

6 Diskussion

6.1 Zielerreichung und Gültigkeit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das stationäre Folgeverhalten eines Referenzkollektivs von Fahrern unter Berücksichtigung unterschiedlicher Witterungsbedingungen zu analysieren. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Beschreibung des Verhaltens anhand künftig im Fahrzeug zur Verfügung stehender Sensordaten, um so die Grundlage für eine Situations- und Witterungsanpassung von Abstandsregelsystemen zu gewinnen.

Eine Beschreibung der Zusammenhänge ausschließlich auf Basis bereits veröffentlichter Ergebnisse ist nicht gelungen. Die Untersuchungen zum Folgeverhalten im realen Straßenverkehr setzen eine aufwendige Abstandsmesstechnik voraus, die der Forschung erst seit wenigen Jahren zur Verfügung steht. Aus diesem Grund mussten in der Vergangenheit die experimentellen Versuche als ortsfeste Verkehrsbeobachtungen oder im Fahrsimulator stattfinden. In den Ergebnissen finden sich teilweise widersprüchliche Beschreibungen, deren Ursachen nach Angaben einiger Autoren weniger dem Fahrerverhalten als vielmehr der Untersuchungsmethodik selbst zuzuordnen sind (Schreiner [130]).

Es wurde deshalb der Ansatz eines Feldversuchs (Breuer [16]) im realen Verkehr gewählt, in dessen Rahmen das tatsächliche Verhalten der Fahrer untersucht werden konnte. Dabei wurde in einem Top-Down-Ansatz zunächst analysiert, welche Parameter Einfluss auf das Längsführungsverhalten ausüben. Mit dem gewählten Ansatz wurden die äußeren Einflüsse variiert. Fahrerbezogene Parameter wurden, unabhängig von den Ursachen eines solchen Verhaltens, in objektiv messbaren Größen durch Kennwerte aufgezeichnet und ausgewertet. Gültig sind die Ergebnisse zur Beschreibung des Folgeverhaltens grundsätzlich jedoch nur für die 24 Versuchspersonen auf der befahrenen Strecke zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung. Bei der Anwendung der Ergebnisse an anderer Stelle sind die nachfolgenden Aspekte zu beachten, die den Versuchsaufbau bereits vorab beeinflusst haben.

6.1.1 Probanden

Zur Übertragung der Ergebnisse auf andere Fahrer war sicherzustellen, dass die Probanden die Zielgruppe möglichst gut repräsentieren. Da das Fahrerverhalten weder von den Versuchspersonen noch von der Zielgruppe bekannt war und auch nicht untersucht

werden sollte, wurde Wert darauf gelegt, wenigstens deren persönliche Eigenschaften hinsichtlich Alter, Geschlecht und Fahrerfahrung [1] in gleichmäßig besetzten Klassen abzubilden. Als zu repräsentierende Gruppe wurde dabei die Gesamtheit der deutschen Autofahrer angesehen. Wie bereits beschrieben, finden sich eine Häufung in der Klasse der 36- bis 45-jährigen sowie eine Unterbesetzung der Klasse der über 55-jährigen. Darüber hinaus sind weibliche Fahrer unterrepräsentiert. Die eingesetzten Probanden stellen somit ein Referenzkollektiv dar.

Die durchgeführte Analyse hatte das Ziel das Fahrerverhalten unabhängig vom Fahrereinfluss und der Intention des Fahrers zu beschreiben. Alle Probanden erhielten vor Fahrtantritt die gleiche Einweisung in das Versuchsfahrzeug. Weiterhin hatten alle den Fahrauftrag, so zu fahren, wie sie es mit ihrem eigenen Fahrzeug tun würden. Die durchgeführten Fahrten hatten kein weiteres Ziel als das reine Abfahren der Strecke und fanden nicht unter Zeitdruck statt. Sie können somit nicht repräsentativ sein für Fahrten, denen ein Motiv mit Einfluss auf das Fahrerverhalten zugrunde liegt, wie beispielsweise Besorgungsfahrten unter Eile kurz vor Geschäftsschluss.

6.1.2 Versuchsstrecke

Um die Übertragbarkeit zu ermöglichen, war die Versuchsstrecke repräsentativ für diejenigen Bereiche auszuwählen, auf die die Ergebnisse übertragen werden sollen. Als Zielgebiet wurde das deutsche Straßennetz gesehen. Es wurde deshalb eine Streckenauswahl getroffen, die sowohl Autobahn- als auch Landstraßenanteile besitzt.

Als Autobahn wurde einerseits eine schwach frequentierte, pro Fahrtrichtung zweistreifig ausgebaute Schnellstraße in einem dünn besiedelten Gebiet genutzt (vgl. **Bild 8.1**). Andererseits umfasst etwa die Hälfte des Autobahnanteils die stark genutzte, pro Fahrtrichtung meist dreistreifige A3 im Ballungsraum Rhein-Main zwischen Aschaffenburg und Frankfurt.

Auch der Landstraßenabschnitt ist zweiteilig. Die erste Hälfte der Strecke bis Michelstadt repräsentiert eine gut ausgebaute und breite Landstraße mit großen Sichtweiten, wie sie im Bereich von Stadtrandgebieten und zur Verbindung von Städten im gesamten Bundesgebiet häufig anzutreffen ist. Der zweite Abschnitt steht für eine typische, ebenfalls gut ausgebaute Landstraße in deutschen Mittelgebirgen. Nicht repräsentiert sind Ortsdurchfahrten und schlecht ausgebaute Landstraßen sowie kurvige Bundesautobahnen.

Die Verkehrsdichten wurden nicht variiert. Die Fahrten fanden stets werktags ab 09:00 Uhr statt. Hierdurch wurden Störungen durch den üblichen Berufsverkehr in den Mor-

gen- und Abendstunden sowie in der Mittagszeit vermieden. Allerdings mit der Folge, dass die Ergebnisse auch nur bei diesen eher niedrigeren Verkehrsdichten gültig sind.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Versuche in den Monaten Mai bis Juli durchgeführt wurden. Zum Zeitpunkt der Versuche herrschte überwiegend regnerisches Wetter mit Temperaturen um 20°C, so dass die Ergebnisse weder auf winterliche noch auf hochsommerliche Witterungsbedingungen mit Temperaturen von über 30° übertragen werden können.

6.1.3 Fahrzeug

Hinsichtlich des Versuchsfahrzeuges sind mit der Übertragung der Ergebnisse auf andere Fahrzeuge ebenfalls Einschränkungen in der Gültigkeit verbunden. Da die Versuchsreihe mit nur einem Fahrzeug durchgeführt wurde, fiel die Wahl auf ein Fahrzeug der Oberklasse. Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung war dies die einzige Klasse, in der die Adaptive Cruise Control eingesetzt wurde und für Versuchszwecke zu Verfügung stand. Um eine unter den genannten Einschränkungen dennoch möglichst gute Übertragbarkeit zu ermöglichen, wurde die Messtechnik im Fahrzeug so untergebracht, dass sie vom Fahrer sowohl während der Fahrt als auch beim Ein- und Aussteigen nicht wahrgenommen werden konnte. Ansonsten befand sich das Fahrzeug im Serienzustand.

Angesichts der Motorisierung mussten die Fahrer während der Fahrt kaum Einschränkungen durch mangelnde Leistung hinnehmen, dafür ist aber zu berücksichtigen, dass nicht allen Fahrern, auf die die Ergebnisse übertragen werden sollen, in ihren eigenen Fahrzeugen solche Leistungsgewichte vorfinden. Vor diesem Hintergrund sind die Aussagen zum Verhalten bei höchsten Geschwindigkeiten bei freier Fahrt mit Vorbehalt zu werten.

6.2 Empfehlungen

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Beschreibung des Fahrerverhaltens in Folgefahrtsituationen kann die Möglichkeit bieten, heutigen Abstandsregelsystemen mit geringem Kostenaufwand einen erheblichen Funktionsgewinn zu verschaffen. Je nach vorliegen zusätzlicher Sensorgrößen, die nach und nach durch den Einzug neuer Fahrerassistenzsysteme in Serienfahrzeugen zur Verfügung stehen werden, lassen sich Anpassungen des ACC an Situation und Witterung vornehmen.

Im Weiteren werden einige mögliche Anpassungen beschrieben, die sich mit den vorhandenen Sensordaten, auf die im Einzelnen hingewiesen wird, umsetzen lassen. Eine

Realisierung der Empfehlungen ist bislang nicht erfolgt. Im Rahmen des Projekts S.A.N.T.O.S konnte allerdings in einem ersten Schritt, jedoch nur mit neun Probanden, die eine statistisch gesicherte Analyse nicht zuließen, tendenziell gezeigt werden, dass sich Fahrer eine situations- und witterungsadaptive Anpassung des Abstandsregeltem-pomaten wünschen, ihr gegenüber hohe Akzeptanz zeigen und darin einen zum Teil erheblichen Gewinn an Komfort und Sicherheit sehen (König et al. [79]).

Als Parameter für die Anpassung von ACC ist die Zeitlücke zu sehen. Wie in den Ergebnissen deutlich wurde, hängt der absolute Abstand von der gefahrenen Geschwindigkeit ab. Dies überdeckt insbesondere in stark unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen die wahren Effekte, wie zum Beispiel die Zeitlückenreduktion bei deutlich erhöhtem Absolutabstand im Vergleich zwischen Autobahn und Landstraße (vgl. **Bild 5.6.** und **Bild 5.7.**).

Die Anpassung der Wunschgeschwindigkeit an die Witterung wird heute noch nicht empfohlen, da in den ersten Untersuchungen (vgl. [84], [85]) zunächst eine situationsangepasste Geschwindigkeit aufgrund digitaler Kartendaten zu ermitteln ist. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, dass die Fahrer Ihre Geschwindigkeit bei Sichtbehinderung nicht in der zu empfehlenden Weise verringern.

Bei einer prozentualen Anpassung der vom Fahrer eingestellten Wunschzeitlücke an die jeweilige Situation, können sich durch faktorielle Überlagerung regelwidrige Zeitlücken ergeben. Eine feste Grenze der zulässigen Zeitlücke findet sich in der Straßenverkehrsordnung (StVO §4, Stand Februar 2005) nicht. Gemäß Bußgeldkatalog wird jedoch ein Bußgeld ab einer Unterschreitung der Hälfte des halben Tachowerts in Metern verordnet, was in etwa einer Zeitlücke von 0,9s entspricht. Unterhalb dieser Grenze darf die Sollzeitlücke nicht sinken. In der ISO-Norm 15622, die das normgerechte Verhalten der Adaptive Cruise Control beschreibt, ist eine Mindestsollzeitlücke von 1,0s festgelegt. Sämtliche Empfehlungen sind nur gültig im Geschwindigkeitsbereich oberhalb 30km/h.

Die nachfolgenden Anpassungsempfehlungen sehen eine tendenzielle Änderung der Zeitlücken entsprechend der in der Untersuchung nachgewiesenen Zusammenhänge vor.

Wie in der Analyse der Grundgrößen des Folgeverhaltens deutlich wurde, wählen die Fahrer die Zeitlücke unabhängig von der Geschwindigkeit, variieren dabei allerdings interindividuell (vgl. **Tabelle 5.2.**). Daraus ist ersichtlich, dass der bisher von den Herstellern verfolgte Ansatz, die Wunschzeitlücke vom Fahrer einstellbar zu gestalten, richtig ist und beibehalten werden muss:

Empfehlung 1:

Zeitlücken für den Fahrer einstellbar.

Erheblichen Einfluss auf das Folgeverhalten hat die Straßenklasse. Es konnte eine höchstsignifikante Reduktion der Zeitlücke von 1,52 auf Landstraßen auf 1,38s auf Autobahnen nachgewiesen werden (vgl. **Bild 5.7.**). Mit der Verfügbarkeit eines Signals im Fahrzeug, das Aufschluss über die befahrene Straßenklasse gibt, kann empfohlen werden:

Empfehlung 2:

Zeitlücken auf der Landstraße um 10% im Vergleich zur Autobahn erhöhen.

Weiterhin wurde gezeigt, dass die Wahl des Fahrstreifens auf Autobahnen einen signifikanten Einfluss auf die gewählte Zeitlücke hat (vgl. **Bild 5.10.**). Es wurden auf dem linken Fahrstreifen durchschnittlich 1,14, in der Mitte 1,40 und rechts 1,57 Sekunden gefahren. Damit entspricht die auf dem mittleren Fahrstreifen gefahrene Zeitlücke dem durchschnittlich auf Autobahnen gefahrenen Wert von 1,38s, weshalb dort die 100%-Marke zu legen ist. Sobald durch entsprechende Sensorik im Fahrzeug der befahrene Fahrstreifen erkannt werden kann, wird auf dreistreifigen Autobahnen folgende situative Anpassung empfohlen:

Empfehlung 3:

Zeitlücke beim Wechsel von mittleren auf den rechten Fahrstreifen um 10% erhöhen, beim Wechsel von der Mitte nach links um 20% reduzieren.

Somit ergeben sich die Querabhängigkeiten wie in **Bild 6.1.** dargestellt. Die Übernahme der vom Fahrer gemäß Empfehlung 1 eingestellten 100%-Zeitlücke ist demnach ortsabhängig. Stellt der Fahrer beispielsweise auf dem linken Autobahnfahrstreifen eine Zeitlücke von 1,1 Sekunden ein, so werden als 100%-Zeitlücke 1,38 Sekunden übernommen (1,1s / 80%). Damit würde das System bei anschließender Landstraßenfahrt eine Zeitlücke von 1,52 Sekunden ($1,38 * 110\%$) regeln.

Autobahn			Landstraße
links	Mitte	rechts	
80%	100%	110%	110%

Bild 6.1.: Zeitlücken Anpassung an den Ort

Eine Anpassung der Folgezeitlücke an die Dynamik der Fahrt ist für den Kennwert „Überholanzahl“ auf Autobahnen sowie für das „Vorbeischaun“ auf Landstraßen möglich. Eine Adaption an die Kennwerte „maximale Verzögerung/Beschleunigung“ wird nicht empfohlen, da im Betrieb des ACC die Längsbeschleunigung vom System selbst geregelt wird und somit als Basisgröße für eine Adaption nicht zur Verfügung steht.

Zur Realisierung einer Anpassung an die Dynamik der Fahrt kann entsprechend der Berechnungsvorschrift aus Kapitel 4.2.1.3 die Anzahl an überholten Fahrzeugen auf Autobahnen herangezogen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Fahrer bei wenigen überholten Fahrzeugen (unter 15) durchschnittlich 1,50 Sekunden, bis 30 überholten 1,31 Sekunden und darüber im Schnitt 1,05 Sekunden Zeitlücke gefahren sind. Sobald im Fahrzeug die Bestimmung der Straßenklasse und das Zählen der überholten Fahrzeuge möglich sind, werden entsprechend obiger 100%-Zeitlückendefinition folgende Faktoren für die Anpassung empfohlen:

Empfehlung 4:

Zeitlückenfaktor auf Autobahn in höchster Überholanzahlklasse (ab 30 Fzg.) 70%,
in mittlerer Klasse (15-29 Fzg.) 90%
und in niedrigster Klasse (unter 15 Fzg.) bei 110% der Grundzeitlücke.

Auf Landstraßen konnte dem „Vorbeischaun“ am voraus Fahrenen ein großer Einfluss auf die Zeitlückenwahl zugeschrieben werden. So wurde die Zeitlücke von durchschnittlich 1,49 Sekunden beim Vorbeischaun auf 1,00 Sekunden reduziert. Mit Ver-

ffügbarkeit des Signals „Vorbeischaun“, zum Beispiel aus der Analyse des Videosignals der Fahrtraumzene, wird folgende Empfehlung ausgesprochen:

Empfehlung 5:

Zeitlückenfaktor auf Landstraßen ohne 110% und mit „vorbeischaun“ 70% bis zum nächsten Überholmanöver.

Wie in der Untersuchung gesehen, erhöhen die Fahrer die Zeitlücke bei Nässe signifikant, die sie bei Sichtbehinderung meist wieder verkleinern. Eine Empfehlung in Richtung hin zu kürzeren Zeitlücken bei Sichtbehinderung erfolgt hier aus Sicherheitsgründen nicht. Bei Nässe allerdings kann, sofern detektierbar (z.B. über Schlupfverhältnisse an Rädern oder bei leichtem Regen über Regensensor), die Zeitlücke entsprechend der gefundenen Größenordnungen erhöht werden. Auf Landstraßen waren dies 1,75 Sekunden bei Nässe im Vergleich zu 1,44 Sekunden bei Trockenheit. Auf Autobahnen wurden 1,69 Sekunden im Vergleich zu 1,30 Sekunden gewählt. Da im Folgeverhalten zwischen Autobahn und Landstraße zu unterscheiden ist, wird als weiteres Signal die Detektion der Straßenklasse benötigt. Nach deren Vorliegen wird jedoch die Empfehlung ausgesprochen:

Empfehlung 6:

Bei Nässe auf der Landstraße die Zeitlücke um 20% erhöhen. Auf der Autobahn bei Nässe die Zeitlücke um 30% erhöhen. Bei darüber hinausgehender Sichtbehinderung zusätzlich Warnung ausgeben, dass weitere Anpassung nicht möglich ist und der Fahrer selbst die Verantwortung trägt.

Bei allen Anpassungen stellt sich das Problem der Transparenz für den Fahrer. Um eine hohe Akzeptanz zu erreichen, sollte der Fahrer nachvollziehen können, warum das System eine bestimmte Zeitlücke einregelt, da er ansonsten das Vertrauen in das System verlieren könnte und es möglicherweise abschaltet. Entscheidend ist, dass der Fahrer ein durchgängig gültiges „Mentales Modell“ des Assistenzsystems bilden kann (Zimmer [154]). Deshalb wird empfohlen, die Regelbasis und die dahinter liegende Strategie mindestens im Handbuch zu erklären oder direkt in geeigneter Form im Fahrbetrieb anzuzeigen.

6.3 Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte im Probandenversuch das Fahrerverhalten in Folgefahrtsituationen analysiert und aus den gewonnen Erkenntnissen Empfehlungen für die Anpassung von ACC an Situation und Witterung gegeben werden. Wie bereits erwähnt, geben die Ergebnisse des Projektes S.A.N.T.O.S Anlass zur Vermutung, dass ein situations- und witterungsangepasstes ACC von den Fahrern gewünscht und akzeptiert wird. Dennoch muss nach der schrittweisen Umsetzung eine Überprüfung im Feld stattfinden.

Es ergeben sich drei Hauptfragestellungen:

- Wie wird es gelingen, das System so transparent zu gestalten, dass der Fahrer stets den Überblick über die Systemaktionen behält?
- In welcher Größenordnung sind die Parameter zu variieren, dass der Fahrer ihnen gegenüber hohe Akzeptanz zeigt und sie gegen interindividuelle Ansprüche robust sind?
- Wie wird der Fahrer ein adaptives System als „Beifahrer im eigenen Fahrzeug“ akzeptieren, das anhand von Messungen an einem Referenzkollektiv ausgelegt wurde?

Vor dem Hintergrund der ständigen Zunahme an Sensordaten im Fahrzeug ergeben sich weitere Möglichkeiten, den Fahrer bei seiner Fahraufgabe im Sinne einer Steigerung von Komfort und Sicherheit zu unterstützen. Mit der Einführung einer automatischen Geschwindigkeitsvorgabe als Wunschgeschwindigkeit für ein ACC, zum Beispiel aus einer digitalen Karte, werden unmittelbar Aussagen benötigt, wie Fahrer ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit von nicht ortsfesten Einflüssen wählen. Erste Hinweise zur Witterungsabhängigkeit der Geschwindigkeitswahl finden sich in der vorliegenden Arbeit. Ungeklärt sind jedoch die fahrerbezogenen Einflüsse, die Gegenstand ergonomischer, arbeitswissenschaftlicher und psychologischer Untersuchungen sind (siehe König, Mayser et al. [79]).

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem stationären Längsführungsverhalten von PKW-Fahrzeugführern und dessen Abhängigkeiten von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung.

Zahlreiche Untersuchungen in der Vergangenheit wurden ortsfest durch Verkehrsbeobachtung durchgeführt und geben keine oder nur punktuelle Antworten auf Fragen nach Abhängigkeiten des Längsführungsverhaltens. Dank neuer Messmöglichkeiten, die sich durch die Einführung von Abstandsregelsystemen ergaben, konnte in jüngeren Untersuchungen nachgewiesen werden, dass Alter, Geschlecht und Fahrerfahrung alleine keinen signifikanten Erklärungsbeitrag für Parameter des Fahrerverhaltens leisten [1].

Die hier im Rahmen des Forschungsprojektes S.A.N.T.O.S (Situations-angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung) durchgeführten Probandenfahrversuche, hatten das Ziel, äußere Einflussparameter auf das Längsführungsverhalten zu identifizieren und deren Abhängigkeiten zu beschreiben, um Empfehlungen zur situations- und witterungsadaptiven Gestaltung von ACC (Adaptive Cruise Control) geben zu können. Im Mittelpunkt der Untersuchung standen drei Fragestellungen bezüglich Abstands-, Zeitlücken- und Geschwindigkeitswahl, Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten und deren gegenseitiger Beeinflussung sowie witterungsbedingter Einflüsse:

- Welche wechselseitigen Abhängigkeiten zeigen die Grundgrößen des Folgefahrungsverhaltens (Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke), basierend auf der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern?
- Wie beeinflusst die Dynamik der Fahrt das Folgefahrungsverhalten?
- Welchen Einfluss haben Trockenheit, Nässe und damit einhergehende Sichtbehinderung auf das Folgefahrungsverhalten?

In einem ersten Schritt wurden zunächst die grundlegenden Abhängigkeiten des Abstandsverhaltens analysiert. In insgesamt 974 ausgewerteten Folgefahrtsituationen zeigte sich, dass PKW-Führer interindividuell zwar unterschiedliche, aber intraindividuell konstante Zeitlücken einhalten. Deutlichen Einfluss zeigt die Wahl des Fahrstreifens auf Bundesautobahnen. Hier wählen Fahrer rechts eine um etwa 50% größere Zeitlücke als auf dem linken Fahrstreifen. Zudem werden erwartungskonform auf dem linken Fahrstreifen im Mittel etwa um 50% höhere Geschwindigkeiten gefahren als rechts. Ein signifikanter Zusammenhang der Abstandswahl mit der Art des Vorausfahrzeuges konnte nur auf Landstraßen bei Nässe festgestellt werden. Fahrzeugführer wählen dort hinter

Nutzfahrzeugen einen etwa 10m geringeren Abstand als hinter PKW. Höchstsignifikant zeigte sich, dass Fahrer im Vergleich zur Landstraße auf Bundesautobahnen einen deutlich erhöhten Abstand, jedoch geringere Zeitlücken einhalten.

Zur Analyse des Einflusses der Dynamik wurden Kennwerte entwickelt, denen die maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen in den letzten fünf Minuten der Fahrthistorie zugrunde liegen. Es zeigte sich eine höchstsignifikante Verkleinerung der Abstände nach Fahrtanteilen mit höheren Verzögerungen. Ebenso konnten höchstsignifikant kürzere Abstände nach Fahrten mit hohen Beschleunigungen nachgewiesen werden. Für die Untersuchung des Geschwindigkeitseinflusses wurde der Kennwert „Tempolimitnutzung“ definiert. Er basiert auf der prozentualen Ausnutzung des geltenden Tempolimits in den letzten 60s der Fahrthistorie. Ein Zusammenhang zwischen dem Abstandsverhalten und der Höhe der Tempolimitausnutzung konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurde die Abhängigkeit der Abstandswahl von der Anzahl eigener Überholvorgänge untersucht. Auf Autobahnen zeigt sich signifikant dichteres Auffahren nach häufigen Überholvorgängen, wohingegen auf Landstraßen bereits der reine Überholwunsch einen Einfluss hat. So fahren Fahrer immer dann am dichtesten auf, wenn sie am voraus Fahrenen vorbeischaun, um potenzielle Überholmöglichkeiten zu erkunden.

Der Einfluss von Nässe und Sichtbehinderung auf Abstandswahl, Geschwindigkeitswahl sowie auf die Dynamik wird sowohl auf Landstraßen als auch auf Autobahnen deutlich. Durchweg wählen Fahrer bei Nässe höchstsignifikant größere Zeitlücken als bei Trockenheit. Mit zusätzlicher Sichtbehinderung fahren Fahrer wieder dichter auf als bei reiner Nässe, was auf Landstraßen dazu führt, dass zwischen Sichtbehinderung und Trockenheit keine signifikanten Zeitlückenunterschiede mehr nachweisbar sind. Auf Autobahnen werden aber bei Sichtbehinderung immer noch größere Zeitlücken eingehalten als bei Trockenheit. Während sowohl bei Trockenheit als auch bei Nässe auf Landstraßen etwa gleiche durchschnittliche Geschwindigkeiten gefahren werden, erhöhen die Fahrer die Geschwindigkeit bei Sichtbehinderung sogar höchstsignifikant. Auf Autobahnen werden die höchsten mittleren Geschwindigkeiten bei Trockenheit erreicht. Aber auch hier kann eine Reduktion signifikant nur bei Nässe, jedoch nicht bei Sichtbehinderung nachgewiesen werden.

Abgeleitet von den Untersuchungsergebnissen wurden Empfehlungen ausgesprochen, wie die Sollzeitlücke in zukünftigen Abstandsregelsystemen an die Witterung, die befahrene Straßenklasse, den Fahrstreifen, die Art des Vorausfahrzeuges und an das Überholverhalten des Fahrers angepasst werden kann.

8 Anhang

Versuchsstrecke

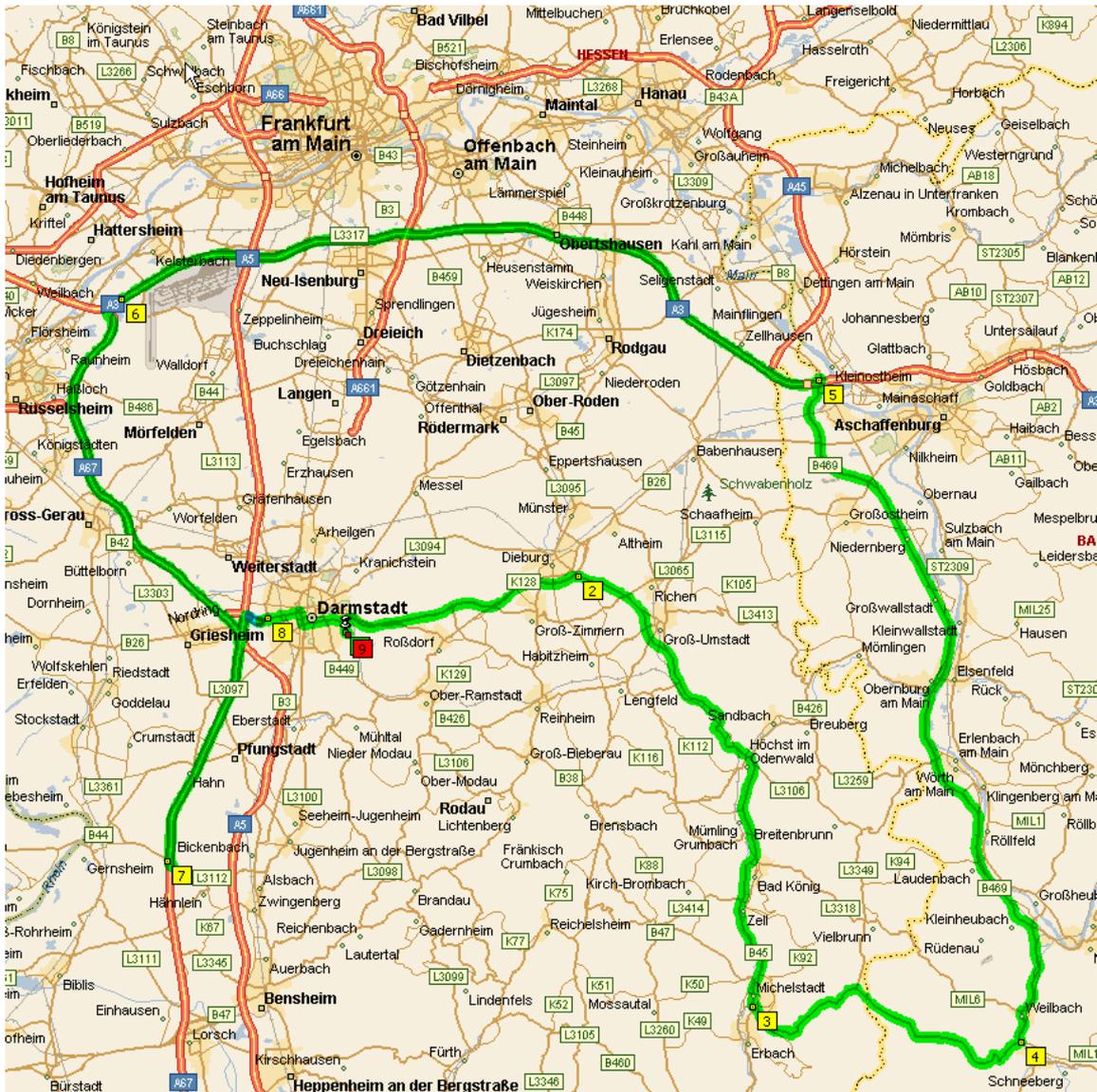


Bild 8.1.: Versuchsstrecke

Die gewählte Strecke (**Bild 8.1.**) führt von Darmstadt Ost (TU Lichtwiese) über die zunächst autobahnähnlich, pro Fahrtrichtung zweistreifig angelegte Bundesstraße B26 nach Dieburg. Dieser etwa 20-minütige Teil bis zur Ausfahrt Dieburg/Groß-Umstadt steht den Probanden als Eingewöhnungsphase zur Verfügung und wird in der Auswer-

tung nicht berücksichtigt. Ab dort beginnt die eigentliche Versuchsstrecke, die für die Auswertung genutzt wird. Sie verläuft auf der Bundesstraße B45 über Höchst nach Michelstadt, wo auf die sehr kurvenreiche aber gut ausgebaute B47 nach Weilbach abgebogen wird. Ab dort verläuft die Strecke über ein wenig befahrenes, autobahnähnlich ausgebautes Teilstück der Bundesstraße B469 mit Hochgeschwindigkeitsanteilen, bevor ab Stockstadt bei Aschaffenburg die meist stark frequentierte, dreistreifige Bundesautobahn A3 bis zum Mönchhofdreieck genutzt wird. Über die A67, zweistreifig mit meist mäßigem Verkehrsaufkommen, führt die Strecke zum Darmstädter Kreuz, von wo aus einmal Richtung Süden bis Gernsheim und auf selbiger Strecke zurück gefahren wird. Am Ortsschild Darmstadt (West) endet die Versuchsfahrt, und die Stadt wird ohne Datenaufzeichnung in West-Ostrichtung bis zu TU-Lichtwiese durchquert. Insgesamt ist die Strecke 215,5km lang. Die Fahrzeit beträgt im Schnitt 2h 30min.

9 Quellen

- [1] Abendroth, B.: Gestaltungspotenziale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen, ergonomia Verlag, ISBN 3-935089-62-7, 2001
- [2] Allen, R. et al.: Driving car following behavior under test track and open road driving condition. SAE-Paper, Nr. 970170 (1997), Intelligent Transportation Systems, SAE Spec. Publ., Vol. SP-1230, S. 7-17
- [3] Andrey, J. et al.: A temporal analysis of rain related crash risk. Proceedings 35th Annual Conference Association for the Advancement of Automotive Medicine, AAM (1991), S. 469-483
- [4] Apel, A.: Modellierung des Fahrverhaltens bei Längs- und Querverkehr von PKW. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger, 1998
- [5] Bald, S.: Untersuchung zum Fahrverhalten auf Landstraßen: Im Auftrag des Hessischen Ministers für Wirtschaft und Technik; Schlußbericht März 1987. Darmstadt 1987
- [6] Becker, S.: Experimentelle Analyse von Anwenderbedürfnissen innerhalb der Entwicklung von Fahrerunterstützungssystemen, VDI Berichte 1317, 1997
- [7] Becker, S.: Telefonieren am Steuer, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M45, bast, Bergisch-Gladbach, 1995
- [8] Benda, Helga von : Die Häufigkeit von Verkehrssituationen. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung; 116, Bergisch-Gladbach 1985
- [9] Bernhard, M.: Zur Bemessung der Haltesichtweite im Straßenentwurf, Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, TU Darmstadt, 1998
- [10] Bielaczek, C.: Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim PKW-Fahren im realen Straßenverkehr. TU Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik. Fortschritt-Berichte, VDI, Reihe 12, Nr. 357, Düsseldorf 1998, S.1-180
- [11] Bleymüller, J.; Gehlert, G.: Statistische Formeln, Tabellen und Programme, 9. Auflage, ISBN 3-8006-2463-X, Verlag Franz Vahlen, München, 1999

-
- [12] Bleymüller, J.; Gehlert, G.; Gülicher, H.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler, München, 1996
- [13] Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 21.Auflage. Düsseldorf 1991
- [14] Braess, H.-H., Reichart, G.: PROMETHEUS – Vision des „intelligenten Automobils“ auf „intelligenter Straße“, ATZ 97, München 1995
- [15] Breuer, B., et al.: Prometheus Bericht Phase III, Untersuchung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, Fahrerverhalten und Beanspruchung unter besonderer Berücksichtigung von Fahrer-Warnstrategien, Forschungsbericht, 1994
- [16] Breuer, J.: Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen, Dissertation TU Darmstadt, VDI, Fortschritt-Bericht 271 Reihe 12, 1996
- [17] Bubb, H., Reichart, G.: Braucht man HUD's im Kraftfahrzeug? Ergebnisse einer Literaturrecherche und eigener Versuche. In: VDI-Berichte Nr. 948, VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik, Das Mensch-Maschine-System im Verkehr, Düsseldorf 1992, S. 101-125, ISBN 3-18-090948-X
- [18] Bubb, H.: Der Fahrprozess, die Informationsverarbeitung durch den Fahrer, LfE - TU München, Technischer Kongress, VDA, Stuttgart, 2002
- [19] Bubb, H.: Wie viele Probanden braucht man zur Funktionsbewertung von aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen. In: Landau, K., Winner, H. (Hrsg.): Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte, VDI, Reihe 12, Nr. 557, Düsseldorf 2003, S. 26-39
- [20] Burckhardt, M.: Abstandsverhalten, Verkehrsfluß und Bußgeldkatalog, Münchener Arbeitskreis für Straßenfahrzeuge, 22. Tagung, München, März 1991
- [21] Burckhardt, M.: Das Fahrzeugfolgeproblem, Verkehrsunfall, Vol.: 18 (1980), Nr. 12, 1980
- [22] Burckhardt, M.: Geschwindigkeitsbegrenzung, Sicherheit und Straßenkapazität, Teil 2, Automobiltechnische Zeitung, Vol.: 78 (1976), NR: 4, 1976
- [23] Busch, S.: Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme, Dissertation an der Fakultät für Verkehrswissenschaften Friedrich List, TU Dresden, 2004
- [24] Chen, Z.: Der Fahrer als Regler für die Folge- und Kolonnenfahrt. Bericht d. Inst. für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig (1992), VIII. IfF-Tagung, Braunschweig, S.147-185

-
- [25] Chen, Z.: Menschliche und automatische Regelung der Längsbewegung von Personenkraftwagen, Dissertation TU Braunschweig, VDI, Fortschritt-Bericht 168 Reihe 12, 1992
- [26] Danner, M.: Der Mensch im Gesamtsystem Fahrzeug/Umwelt. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, VOL: 27 (1981), Nr. 2, München 1981, S. 52-55
- [27] De Vos, A.: Driver behaviour under bad weather. Isata-Proc, NR: 920131 (1992) 25th ISATA, Proc.: Road Transport Informatics/Intelligent Vehicle Highway Systems, S.427-434
- [28] Demirkaya, M.: Mikroverkehrsdemonstrator für echtzeitfähige Fahrermodelle und Assistenzsysteme. Berlin, Technische Universität, Dissertation 1999
- [29] Dingus, Th., et al.: Human Factors Field Evaluation of Automotive Headway Maintenance/Collision Warning Devices, Virginia Institute and State University, Human Factors and Ergonomics Society, 1997
- [30] Donges, E.: Aktive Sicherheit und Fahrdynamik von Personenkraftwagen. MAS-Ber. (1985), Fahrwerk und Motor. 10. Fachtagung des Münchener Arbeitskreises für Straßenfahrzeuge, S. 1-9
- [31] Donges, E.: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol: 24 (1978), NR: 3, S. 98-112
- [32] Dorißen H. Th., Höver, N.: Autonome Intelligente Geschwindigkeitsregelung (AICC) – Ein Beitrag zur Steigerung des Komforts und der aktiven Sicherheit, ATZ 98, Geseke-Langeneicke 1996
- [33] Dreyer, W. et al.: Regelkreis Fahrer-Kraftfahrzeug und Kolonnenfahrt. Automobil-Industrie, Vol: 29 (1984), NR: 1, TU Braunschweig, S. 95-191
- [34] Dreyer, W.: Aspekte der Fahrunterstützung im Längs- und Querregelkreis. Bericht des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig 1989, VII. IfF-Tagung Braunschweig. S. 111-158
- [35] Dreyer, W.: Längsdynamik des Systems Fahrer-Fahrzeug. Forschungs-Bericht, Sonder-Forschungs-Bereich 97, Fahrzeuge und Antriebe, TU Braunschweig, Teilprojekt Stadtkraftfahrzeuge, NR: 48 (1976). S. 1-83
- [36] Dreyer, W.: Zum längsdynamischen Verhalten des Regelkreises Fahrer-Kraftfahrzeug. Dissertation, TU Braunschweig (1980), S. 1-147

- [37] Ehmanns, D. et al.: Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung. 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen 2000
- [38] Ehmanns, D., Wallentowitz, H., Gelau, Chr., Nicklisch, F.: Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung. 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2000, Institut für Kraftfahrwesen (ika). RWTH Aachen, 2000
- [39] Ernst, R.: Zum Einfluß winterlicher Fahrbahnbedingungen auf die Verkehrssicherheit. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol: 33 (1987), NR: 3. S. 127-128
- [40] Fancher. et al.: A field operational test of adaptive cruise control: system operability in naturalistic use. SAE-Paper, NR: 980852 (1998). IST Advanced Controls and Vehicle Navigation Systems SAE Spec. Publ., Vol: SP-1332, S. 85-96
- [41] Färber, B.: Telematik-Systeme und Verkehrssicherheit, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M104, bast, Bergisch-Gladbach, 1999
- [42] Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1995, ISBN 3-8249-0278-8
- [43] Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation: neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme. Deutscher Psychologen-Verlag, Bonn 1995
- [44] Fastenmeier, W.: Fahrerunterstützung durch ACC. 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, Bd.1, 1998. S. 567-582
- [45] Feraric, J., et al.: Automatische fahreradaptive Längsführung. München, Univ. der Bundeswehr, 1995
- [46] Feraric, J.: Echtzeitfähige Modellierung des individuellen Fahrerverhaltens zur Realisierung adaptiver Unterstützungsfunktionen in einem Monitor- und Warnsystem. München, Univ. der Bundeswehr, Dissertation 1996
- [47] Fiala, E. et al.: Simulator-Versuche zur Untersuchung der Dynamik der Kolonnenfahrt. Forschungsbericht, Institut für Kraftfahrzeuge, TU Berlin 1968
- [48] Fiala, E.: Fahrzeug - Mensch - Verkehr. VDI-Berichte: Das Mensch-Maschine-System im Verkehr. VDI-Berichte Nr. VOL: 948, S. 1-13, Düsseldorf 1992

-
- [49] Filzek, B.: Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich, VDI, Fortschritt-Bericht 536 Reihe 12, ISBN 3-18-353612-9, 2003
- [50] Frischer, S.: Modell zur Beeinflussung von Fahrzeugabständen und Geschwindigkeiten. Wien, Bundesministerium für Wissenschaft, Verkehr und Kunst. Wien 1996
- [51] Fröhlich, T.: Begleitung von Fahrversuchen und Auswertung der Videodaten, Studienarbeit Nr. 743/98 fzd, TU-Darmstadt, 1998
- [52] Habermehl, K.: Fahrverhalten und Unfallentwicklung auf hessischen Autobahnen, Institut für Verkehr, Fachgebiet Straßenwesen, TU Darmstadt 1989
- [53] Hagleitner, W. et al.: Intelligent Cruise Control: Performance Studies Based Upon an Operation Prototype, IVHS America 1994 Annual Meeting, Atlanta, Paper #94011
- [54] Haller, R.: HMI – New Technologies and Safety Perspectives, Proceedings of the 10th International Conference Traffic Safety on two Continents, Malmö, 1999
- [55] Hamberger, W., Willumeit, H.-P.: Navigationssysteme als Datenbasis für ein adaptives Antriebsmanagement, ATZ 98, Berlin 1996
- [56] Hamberger, W.: Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädiktiven Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung, Dissertation TU Berlin, VDI, Fortschritt-Bericht 371 Reihe 12, 1999
- [57] Han, S. et al.: The Daimler-Benz driving simulator - presentation of selected experiments. SAE - Paper, NR: 880058 (1988), S. 1-7
- [58] Hanke, H.: Quantifizierung des Einflusses winterlicher Fahrbahnzustände auf die Verkehrssicherheit. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol: 36 (1990), NR:1, S. 13-21
- [59] Hartwich, E.: Längsdynamik und Folgebewegung des Straßenfahrzeugs und ihr Einfluß auf das Verhalten der Fahrzeugschlange, Dissertation am Fachgebiet Regelungs- und Datentechnik, TU Darmstadt 1971
- [60] Hattori, Y. et al.: Deceleration driver model considering driving task in high-speed following situation. AVEC 96 International Symposium on Advanced Vehicle Control , Vol: 2 (1996). Institut für Fahrzeugtechnik, RWTH Aachen, S. 1333-1342

- [61] Hawkins, R.: Verkehrsverhalten auf Autobahnen unter Bedingungen eingeschränkter Sicht. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol: 34 (1988), NR: 2/II, S. 74-79
- [62] Hayafune, K. et al.: A study of safety drive control. FISITA-Paper, NR: 945154 (1994), 25. FISITA Congress, Beijing C Vol: 4 - Safety, S. 30-37
- [63] Heinz, G.: Erhöhtes Unfallrisiko bei Nässe. Straßenverkehrstechnik, Vol: 25 (1981), NR: 6, Inst. für Straßen- und Verkehrswesen, Univ. Stuttgart, S. 188-194
- [64] Hiersche, E. et al.: Bewertung des Fahrverhaltens auf nassen Fahrbahnen unter Einsatz der konduktometrischen Messsonde, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn, Bad Godesberg 1989
- [65] Hochstädter, A. et al.: Ein universelles Fahrermodell mit den Einsatzbeispielen Verkehrssimulation und Fahr Simulator. 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. Aachen 2000
- [66] Hoefs, D.: Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1972 und Univ. Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Dissertation 1972
- [67] Hoffmann, G.: Witterungsbedingte Veränderungen der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs auf innerstädtischen Autobahnen und Hauptverkehrsstraßen, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn, Bad Godesberg 1984
- [68] Holdmann, P., Wallentowitz, H.: 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, ATZ 101, 1999
- [69] Honda Motor Company: „Honda Obtains Approval from the Minister of Transport for the Honda Intelligent Driver Support (HIDS) System for Public Road Testing“, Honda Pressemitteilung, <http://world.honda.com/news/2000/c000321.html>, 21.03.2000
- [70] Huguenin, R.: Fahrverhalten im Straßenverkehr. Forschungsgemeinschaft „Der Mensch im Verkehr“ e.V., Köln 1988
- [71] Jansson, W. et al.: An experimental evaluation of in-vehicle collision avoidance systems. ISATA-Proc, NR: 910028 (1991) 24th ISATA, Proc.: Road Transport Informatics (RTI)/Intelligent Vehicle Highway Systems (IVHS). S. 209-214

- [72] Johannsen, G.: Entwicklung und Optimierung eines vielparametrischen nichtlinearen Modells für den Menschen als Regler in der Fahrzeugführung. TU Berlin, Dissertation 1971
- [73] Jürgensohn, Th., Jung, R., Willumeit, H.-P.: Die „Handschrift“ des Lenkens, ATZ 99, Berlin 1998
- [74] Kaeppler, W. et al.: Wirksystem Fahrer - Fahrzeug - Umwelt. TÜV Rheinland, Institut für Verkehrssicherheit (1985), Verkehrs-Sicherheit und Wirksystem Fahrer - Fahrzeug -Umwelt, Köln. S. 13-44
- [75] Kang, K.: Ordered Probit Model of the Speed Selection Behavior: Results Based on a Korean Micro Data. Ersch. in Hans von Holst: Transportation, traffic safety and health. ISBN 3-540-67445-4, RWTH Aachen 1988
- [76] Kita, H.: Design of Driving Environment, Driving Behavior and Traffic Safety. Hans von Holst: Transportation, traffic safety and health. ISBN 3-540-67445-4. RWTH Aachen 1988
- [77] Knepper, S.: Untersuchung des Geschwindigkeits- und Abstandsverhaltens auf nasser bzw. trockener Fahrbahn unter Berücksichtigung der Lichtverhältnisse sowie der Wochentage. TU Karlsruhe, Dissertation 1992
- [78] Koessler, W.: Mathematische Analyse des Verkehrsflusses mit Überholen. Hochschulschrift, Fak. f. Allg. Wiss., TU München, Dissertation 1972
- [79] König, W., Weiß, K.-E., Mayser, Chr.: S.A.N.T.O.S (Situations-Angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung), Gemeinsamer Abschlussbericht der Robert BOSCH GmbH und der BMW Group, BMBF-Förderkennzeichen 19S9826A/B, TIB Hannover, 2004
- [80] Kudritzki, D.: Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens. TU Berlin, Dissertation 1989. Fortschritt-Berichte. VDI-Verlag Düsseldorf 1989
- [81] Leutzbach, W. et al.: Probleme der Kolonnenfahrt. Bonn, Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1966
- [82] Leutzbach, W. et al.: Spurwechselforgänge auf dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen: Forschungsauftrag; Contract 1-082-G-81-H, Hrsg. Institut für Verkehrswesen, TH Karlsruhe; Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1984

- [83] Leutzbach, W. et al.: Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Wahrnehmung in konkreten Verkehrssituationen. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, 177 (1988)
- [84] Lippold, Ch. et al.: "Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Längsregelung im ungebundenen Verkehr" Tagungsband zu den Verkehrswissenschaftlichen Tagen der TU Dresden am 22. und 23.09.03 in Dresden
- [85] Lippold, Ch. et al.: "Speed-Control - Ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung der Geschwindigkeitswahl", Tagungsband zur 1. Dresdner Tagung „Verkehrssicherheit interdisziplinär“ am 27. und 28.06.2003 in Dresden
- [86] Ludmann, J. et al.: Fahrermodelle als Hilfsmittel für die Entwicklung von ACC-Systemen. TH Aachen, Inst. f. Kraftfahrwesen. Automobiltechnische Zeitschrift, VOL.:101 (1999), NR: 5, S. 306-315
- [87] MacAdam, C. et al.: Using neural networks to identify driving style and headway control behavior of drivers. Proc. 15th IAVSD-Symposium (1998), Int. Association for Vehicle System Dynamics, Symposium Budapest, August 1997, S 143-160
- [88] Maijad, R.: Hybride Modellierung und Identifikation eines Fahrer-Fahrzeug-Systems. TU Karlsruhe, Dissertation 1997
- [89] Maretzke, J. et al.: Fahrer-Fahrzeug-Verhalten bei kritischen, durch verminderten Kraftschluß entstehenden Fahrsimulationen. IfF Ber. Inst. f. Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, NR: 594 (1982), S. 1-120
- [90] Maretzke, J. et al.: Systems for driver support in the longitudinal lateral control of motor vehicles. FISITA-Paper, NR: 905165 (1990), 23. FISITA Congress Turin (May 1990), Proc. Vol. 2, S. 2359-2364
- [91] Marsden, G. et al.: Inter-urban scenario assessment of adaptive cruise control. ImechE-Paper, NR: S653/003/99 (1999) Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), IMechE Seminar VOL: 1999-13, S. 21-29
- [92] Mayser, Chr.: An advanced Concept for Driver Assistance Systems (S.A.N.T.O.S-Project), Proceedings of the 9th World Congress on ITS, ITS America, 2002
- [93] McGehee, D., et al.: An experimental field test of automotive headway maintenance/collision warning visual displays, CAD-Center, University of Iowa, Proceedings of the Human Factors and ergonomics society 38th annual meeting, 1994

- [94] Mitsch, J.: Das Verhalten des Kraftfahrzeuglenkers bei Seitenwind. Österreichische Ingenieur Zeitung, VOL: 131 (1986), NR: 11/12, 1986
- [95] Mitschke, M.: Betrachtungen zum heutigen Stand des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug, VDI, Fahrdynamik und Regelungskomfort, VDI-Bericht 546, 1984
- [96] Mitschke, M.: Der Fahrer als adaptiver Regler, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), Schriften Reihe 91, 1991, ISSN 0933-050X
- [97] Mitschke, M.: Der Fahrer als adaptiver Regler; Simulatorversuche und Ergebnisse für das Fahrer-Verhalten. Institut für Fahrzeugtechnik, Bericht Nr. 690; TU Braunschweig, August 1989
- [98] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1995
- [99] Naab, K.: ACC in Ballungsräumen. 7. Aachener Kolloquium, Fahrzeug- und Motorentchnik, Bd. 1, Aachen 1998, S. 551-565
- [100] Naab, K.: Driver Assistance Systems for lateral and longitudinal Vehicle Guidance – Heading Control and Adaptive Cruise Control, BMW AG, München, Proceedings AVEC 1994, S. 447-454
- [101] Naab, K.: Heading Control - Ein System zur Fahrerunterstützung bei der Spurlaltung, BMW AG, München, Haus der Technik, 1998, Essen
- [102] Neculau, M.: Modellierung des Fahrerverhaltens: Regel- und Steuerstrategien. VDI-Berichte (1992): Das Mensch-Maschine-System im Verkehr, VDI-Berichte Nr. VOL: 948, S. 211-225
- [103] Newcomb, T.B.: Driver Behaviour During Braking. Univ. of Technologie Loughborough, Dep. of Transp. Technol. (GB). SAE-Paper NR: 810832 (1981), S. 1-9
- [104] Nirschl, G., Tölle, W.: Entwicklung von Assistenzstrategien zur Fahrerwarnung und -unterstützung bei Unterschreitung von Sicherheitsreserven, 1. Zwischenbericht zum EUREKA Verbundprojekt PROMETHEUS, Phase III, IITB, Karlsruhe, 1993
- [105] Nirschl, G.: Kopf, M., Untersuchung des Zusammenwirkens zwischen dem Fahrer und einem ACC-System im Grenzsituationen, VDI Berichte 1317, 1997
- [106] Nirschl: Fahrer- und situationsspezifische Einflussfaktoren bei AICC-Fahrerassistenzsystemen, Beitragsmanuskript zu den IITB-Mitteilungen 95

-
- [107] Noecker, G.: Abstandsregelung. VDI-Bericht (1990): Neue Konzepte für den fließenden und ruhenden Verkehr VDI-Berichte Nr. VOL: 817, S. 327-337
- [108] Peters, H.: Die nutzergerechte Gestaltung von Informationssystemen im Fahrzeug – Anforderungen für Design und Prüfung, VDI Berichte 1317, 1997
- [109] Piske, R. et al.: Entwicklung neuer Strategien zum kooperativen Fahren. VDI-Berichte (1992): Das Mensch-Maschine-System im Verkehr, VDI-Berichte, Nr. VOL: 948, S. 55-77
- [110] Prestl, W. et al.: The BMW active cruise control ACC. BMW, München, SAE-Paper, NR: 2000-01-0344 (2000), Intelligent Vehicle Systems SAE Spec.Publ. Vol: SP-1538, S. 1-8
- [111] Ramakers, T.: Theoretische Fahrermodelle in der Computersimulation. Studienarbeit am Institut für Kraftfahrwesen (ika). RWTH Aachen, März 1997
- [112] Regensburger, F. et al.: Aktuelle Verkehrsprobleme in amerikanischer Sicht. Köln, HUK-Verband 1963
- [113] Reichart, G., Haller, R.: Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr. In: Autofahrer und Verkehrssituation, Hrsg. Fastenmeier, W., Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1995
- [114] Reichart, G.: Fahrerassistenzsysteme und ihre Auswirkungen auf das Fahrwerk, Vortrag am „Tag des Fahrwerks“, IKA, RWTH-Aachen, 05.10.1998
- [115] Reichelt, W.: Ein adaptives Fahrermodell zur Bewertung der Fahrdynamik von Pkw in kritischen Situationen, Dissertation TU Braunschweig 1990
- [116] Reiter, U.: Modellierung des Einflusses von Informationssystemen auf das Fahrverhalten. TU Karlsruhe. VDI-Berichte (1992) Das Mensch-Maschine-System im Verkehr, VDI-Berichte Nr. VOL: 948, S. 189-210
- [117] Rice, R.S. et al.: Automobile driver characteristics and capabilities „The man off the street“. SAE-Paper, NR: 760777 (1976), S. 1-9
- [118] Risse, H.: Das Fahrerverhalten bei normaler Fahrzeugführung. TU Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik. Fortschritt-Berichte, VDI 160/12, 1991
- [119] Risse, H.: Regelverhalten des Fahrers bei der Fahrzeugführung. VDI-Berichte (1991), Berechnung im Automobilbau. VDI-Berichte Nr. VOL: 816, S. 569-578

-
- [120] Robert BOSCH GmbH: Sicherheits- und Komfortsysteme, 3. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2004, ISBN 3-528-13875-0
- [121] Roenitz, R.: Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW. Eine Übersicht. Vortrag-Veröffentl.1978, Entwickl.-Stand d. objekt. Testverfahren für das Fahrverhalten (Kolloq. TÜV Rheinl.), Kolloq.-R. Akt.Fahrsicherh., S. 6-27
- [122] Rompe, K.: Fahrer-Assistenz-Systeme – Welche Bedeutung haben sie für die Verkehrssicherheit, TÜV Kraftfahrt GmbH, Köln, XVIII. μ -Symposium, 23./24.10.98, Bad Neuenahr
- [123] Rompe, K.: Verkehrssicherheit und Wirksystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt. TÜV Tech. Ueberwach, VOL: 26 (1985), NR: 3, S.113-117
- [124] Rüter, G. et al.: Der Mensch als Fahrzeugführer. Kybernetisches Verhalten und dessen Simulation. BAST-Bericht (1976), Forschungs-Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen. S. 1-119
- [125] Sakata, H. et al.: A study on speed control by human drivers in car-following. JSAE-Rev, VOL: 10 (1989), NR: 3, S. 52-59
- [126] Sala, G., Pressi, F.: Strategies for Intelligent Cruise Control Application, Centro Studi sui Sistemi di Trasporto, Mizar Automazione, Telematics for Transport
- [127] Sayer, J., Mefford, M. L., Fancher, P., Ann Arbor: Consumer Acceptance of Adaptive Cruise Control following experience with a prototype System, MI, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 39th annual meeting, 1995
- [128] Scharsching, H.: Witterungsbedingungen, Verkehrsverhalten, Verkehrssteuerung. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien 1988
- [129] Schiberna, P., Lechner, G., Duminy, St.: Messsystem für Streckendaten, ATZ 100, Stuttgart 1998
- [130] Schreiner, F.: Automatische Führung des Kraftfahrzeugs mit fahreradaptiven Eigenschaften, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 404, VDI Verlag Düsseldorf, Düsseldorf 1999, ISBN 3-18-340412-5
- [131] Schuller, J. et al.: A driver model as development tool for vehicle handling design. Proc. 16th IAVSD Symposium (1999), Int. Association for Vehicle System Dynamics, Symposium Pretoria. Aug.-Sept. 1999, S. 110-121

- [132] Spacek, P.: Fahrverhalten und Unfallgeschehen in Kurven, Fahrverhalten in Kurvenbereichen, Forschungsarbeit Nr. 16/84, Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute, Juli 1997
- [133] Spacek, P.: Spurverhalten, Kirschbaum, ZS Straßenverkehrstechnik 2/99
- [134] Steck, B.: Auswertung und Beurteilung von Abstandsmessungen im Straßenverkehr mit der Hilfe der Methoden der mathematischen Statistik. Münchener Arbeitskreis für Straßenfahrzeuge, 22. Tagung München, März 1991, S. 1-56
- [135] Turrentine, Th., Sperling, D., Hungerford, D.: Consumer Acceptance of ACC and Collision Avoidance Systems, Highway Systems – Human Performance and Safety, Washington DC, 1991
- [136] van der Horst, R., et al.: Time-to-collision and collision avoidance systems, TNO Institute for Human Factors Soesterberg / NL, Proceedings of the 6th ICTCT Workshop, Kuratorium für Verkehrssicherheit Salzburg, 1993
- [137] Vossebürger, F.-J.: LIS – Universal Infrarot Fahrspurerkennung, A.D.C. GmbH, Lindau / Bodensee, 17.11.1998, unveröffentlicht
- [138] Wallentowitz, H.: Längsdynamik von Kraftfahrzeugen. Institut für Kraftfahrwesen (ika). RWTH Aachen 1997, 1. Neuauflage
- [139] Wanzke, E. et al.: Zu einigen Zusammenhängen zwischen Wetter und Verkehrssicherheit. Kraftverkehr, VOL: 23 (1980), NR: 5, S. 242-244
- [140] Weinberger, M.: Der Einfluss von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrerverhalten, Berichte aus der Ergonomie, Shaker-Verlag, Aachen, 2001, ISBN 3-8265-9082-1
- [141] Weisse, J., Landau, K., Mayser, Chr., König, W.: A user-adaptive driver assistance system, ORP2002, 2nd International Conference on Occupational Risk Prevention, 20-22.02.02, Gran Canaria Island, 2002
- [142] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, Suchbegriff „Dynamik“, www.wikipedia.de, 2004
- [143] Willumeit, H. et al.: Fahrermodelle, ein kritischer Überblick, Teil 1+2. Automobiltechnische Zeitschrift, VOL: 99 (1997), NR: 7/8-9
- [144] Willumeit, H.-P., Wolter, Th.-M.: Tagungsbericht: Das Mensch-Maschine-System im Verkehr, ATZ 94, Berlin 1992

- [145] Willumeit, H.-P.: Wohin führen Assistenzsysteme? Entscheidungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen, 2. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, Berlin 7.-9. Okt. 1997, ZMMS Spektrum, Bd. 5, Sinzheim, Pro Universitate Verlag, 1998
- [146] Winner, H. et al.: Adaptive Cruise Control System Aspects and Development Trends, SAE Paper 961010, Warrendale, USA, 1996
- [147] Winner, H.: Adaptive Cruise Control. In: Jürgen, R. (Hrsg.): Automotive Electronics Handbook, 2nd Edition, Mc Graw Hill, 1999
- [148] Winner, H.: Vorlesungsunterlagen Fahrerassistenzsysteme, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, 2004
- [149] Witte, S.: Simulationsuntersuchungen zum Einfluss von Fahrerverhalten und technischen Abstandsregelsystemen auf den Kolonnenverkehr, TH Karlsruhe, Dissertation 1996
- [150] Wolter Th.-M., Jürgensohn, Th., Willumeit, H.-P.: Ein auf Fuzzy-Methoden basierendes Situations-Handlungsmodell des Fahrerverhaltens, ATZ 99, Berlin 1997
- [151] Wolter, T.M. et al.: Ein „visuelles System“ für ein Fahrermodell. VDI-Berichte (1992). Das Mensch-Maschine-System im Verkehr, VDI-Berichte Nr. VOL: 948, S. 227-234
- [152] Würtenberger M.: Communication and Information Systems – A Comparison of Ideas, Concepts and Products, BMW AG, SAE Intelligent Vehicle Systems (SP-1538), Paper 2000-01-0810, ISBN 0-7680-0588-4
- [153] Yap, A.: Beitrag zur mathematischen Modellierung der Fahrspurfindung im Fahrzeugführungsproblem, Esslingen, VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 398, VDI Verlag Düsseldorf, Düsseldorf 1999, ISBN 3-18-339812-5
- [154] Zimmer, A.: Assistenz: Wann, wie und für wen? Zeitschrift für Verkehrssicherheit 48, S. 15 - 21. TÜV-Verlag Rheinland, Berlin, 2002
- [155] Zomotor, A., Breass, H.-H., Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen, ATZ 100, 1998
- [156] Zomotor, A.: Fahrverhalten. IRT Regelungstechnik, in: Fahrwerktechnik; O, 1.Auflage, 1987

Lebenslauf

Dipl.-Ing. Norbert Fecher
Gerstenberger Straße 18a
63846 Laufach

- Persönliche Daten

Geburtsdatum:	7. April 1970
Geburtsort:	Aschaffenburg
Familienstand:	verheiratet, 3 Kinder
Staatsangehörigkeit:	deutsch

- Schulische Ausbildung

1976 – 1980	Grundschule Sailauf
1980 – 1989	Hanns-Seidel-Gymnasium Hösbach
1989	Allgemeine Hochschulreife

- Wehrdienst

1989 – 1991	Panzergranadierbataillon 52 Rotenburg a.d. Fulda
-------------	---

- Universitäre Ausbildung

1991 – 1998	Allgemeiner Maschinenbau, TU Darmstadt
1998	Abschluss Dipl.-Ing.

- Berufliche Tätigkeit

1998 – 2004	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt
seit Juli 2004	Oberingenieur am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt